

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



APOYO A LA DECISIÓN PARA EL DISEÑO Y LA
PLANEACIÓN INTEGRADOS DE UNA CADENA DE
SUMINISTRO

POR

MARÍA DE LOS ÁNGELES BÁEZ OLVERA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MONTERREY, NUEVO LEÓN, ENERO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



APOYO A LA DECISIÓN PARA EL DISEÑO Y LA
PLANEACIÓN INTEGRADOS DE UNA CADENA DE
SUMINISTRO

POR

MARÍA DE LOS ÁNGELES BÁEZ OLVERA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MONTERREY, NUEVO LEÓN, ENERO 2015

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis «Apoyo a la decisión para el diseño y la planeación integrados de una cadena de suministro», realizada por la alumna María de los Ángeles Báez Olvera, con número de matrícula 1508350, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de tesis

Dra. Ada M. Álvarez Socarrás

Asesora

Dr. Fernando López Irarragorri

Asesor

Dr. Miguel Mata Pérez

Revisor

Dr. Juan Carlos Leyva López

Revisor

Dra. Laura Cruz Reyes

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Posgrado

Monterrey, Nuevo León, Enero 2015, enero 2015

A mis padres con todo mi cariño.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas más importantes en mi vida. Mis padres el Sr. Miguel Angel y la Sra. Mercedes quienes me enseñaron a luchar en la vida y a quienes les debo ser lo que soy. A mis hermanos y sobrinos quienes le quitan lo simple a mi vida y siempre esta conmigo

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y a la Univesidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo financiero otorgado para la realización de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) quien me becó durante mis estudios de doctorado.

Al Posgrado de Ingeniería de Sistemas y sus profesores quienes me ayudaron a mi formacion académica y me brindaron su tiempo y paciencia.

Agradezco en toda la extensión de la palabra a mis directores de tesis la Dra Ada M. Álvarez Socarrás por brindarme su tiempo, conocimiento y mucha pero mucha paciencia para la realización de este trabajo y al Dr. Fernando López por todo la paciencia que me tuvo, por brindarme no sólo su conocimiento sino también su amistad.

Agradezco a mi comité de tesis la Dra. Laura Cruz Reyes, el Dr. Juan Carlos Leyva y el Dr. Miguel Mata por el tiempo que le dedicaron, por sus observaciones y contribuciones a este trabajo.

Agradezco a mis amigos Leo, Moni, Ana, Oliver, Yaja, Lucero, Alondra y Xo-

chitl por escucharme, ayudarme y compartir conmigo sus conocimientos y no dejarme caer en los momentos duros. Y a mis compañeros quienes hicieron mi estancia como estudiante de PISIS agradable.

A todos quienes confiaron en mí

GRACIAS!!!

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	v
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Hipótesis	4
1.3. Justificación del problema	4
1.4. Objetivo de la investigación	5
1.5. Contribución científica	6
1.6. Estructura del documento	6
2. Marco teórico y estado del arte	7
2.1. Proceso de toma de decisiones	7
2.2. Clasificación de los problemas de decisión	9
2.3. Análisis de la decisión multicriterio	11
2.4. Toma de decisiones bajo criterios múltiples	12
2.5. Problemas de decisiones multiobjetivo	17

2.6. Medidas de desempeño	22
2.7. Cadenas de suministro con orientación a resultados	25
2.8. Estado del arte	28
2.8.1. Apoyo a la decisión en las cadenas de suministro	28
3. Planteamiento del problema y metodología de solución	35
3.1. Planteamiento del problema	35
3.2. Metodología de apoyo a la decisión	37
3.2.1. Fase I o pre-selección de proveedores	38
3.2.2. Fase II o fase de optimización	41
3.2.3. Fase III o fase de selección	52
4. Experimentación	55
4.1. Experimentación fase I: evaluación de los proveedores	55
4.2. Experimentación fase II: optimización de la cadena	60
4.2.1. Comparación con resultados de la literatura para problemas relacionados	60
4.2.2. Descripción del generador de instancias	68
4.3. Diseño de experimento	72
4.4. Experimentación fase III: Región de interés	77
5. Conclusiones	82
5.1. Trabajo futuro	84

A. Frentes de las instancias de Olivares y el de nosotros	99
B. Datos para el diseño de experimentos	108
C. Resultados del diseño de experimentos	111
D. Relación de superación	118
E. Resultados de la fase 3 de la metodología	123

RESUMEN

María de los Ángeles Báez Olvera.

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

APOYO A LA DECISIÓN PARA EL DISEÑO Y LA PLANEACIÓN INTEGRADOS DE UNA CADENA DE SUMINISTRO

Número de páginas: 128.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de este trabajo es el estudio de un problema de toma de decisiones en una cadena de suministro en la que se involucran problemas de selección de proveedores, localización de instalaciones y distribución de flujo. Se busca integrar el diseño y la planeación de la cadena de suministro desde una perspectiva orientada a resultados, con el objetivo de optimizar ciertas medidas de desempeño.

Este problema no ha sido tratado como tal en la literatura científica, por lo que se propone una metodología dividida en tres fases en la que por un lado se integra la

selección de proveedores al diseño de la cadena de suministro desde una perspectiva multicriterio. Esto se realizó bajo el análisis de la decisión multicriterio, el cual ayuda a obtener una selección de proveedores apegada a las preferencias de los tomadores de decisiones.

Por otro lado, el diseño, la planeación y optimización de la cadena de suministro se lleva a cabo mediante técnicas de exactas de optimización, para finalizar con el análisis de los soluciones.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La principal contribución de este trabajo es una metodología integrada de apoyo a la decisión desde una perspectiva dirigida a resultados.

De acuerdo a la revisión de literatura realizada, no se reportan trabajos que contemplen en conjunto las características y consideraciones del problema aquí planteado, por lo que este estudio será de utilidad para problemas afines.

El problema se modela a través de tres fases, en la que se involucran integrar el diseño y la planeación de la cadena de suministro desde una perspectiva dirigida a resultados. Se formula un modelo matemático en el que se involucraron todos los aspectos y limitaciones de la cadena de suministro.

La implementación y desarrollo computacional del método de solución se realiza mediante Concert Cplex y C++. Los experimentos computacionales mostraron que con los métodos exactos es posible resolver instancias de tamaño mayores dentro de un tiempo computacional razonable. Así mismo el estudio permitió identificar como influye la estructura de la instancia en el tiempo computacional.

Firmas de los asesores:

Dra. Ada M. Álvarez Socarrás

Dr. Fernando López Irarragorri

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Una cadena de suministro está integrada por todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirectamente en satisfacción del cliente, estas partes pueden ser proveedores de componentes o proveedores de materias primas, plantas o fabricantes, bodegas, centros de distribución y clientes. Cada parte tiene sus funciones que participan en la recepción y el cumplimiento de una petición al cliente, pero no están limitadas al desarrollo de nuevos productos, la mercadotecnia, las operaciones, la distribución, las finanzas y el servicio al cliente (Chopra y Meindl, 2008). Cada parte de la cadena se conecta con otras a través del flujo de productos o información. El diseño apropiado de la cadena depende de las necesidades de las funciones que desempeñe cada parte.

Las decisiones sobre el diseño, planeación y operación de la cadena de suministro desempeñan un papel importante en el éxito o fracaso de una compañía. Dentro de una cadena de suministro se toman varias decisiones y estas se clasifican en: estratégicas, tácticas y operativas y son tomadas en dependencia del horizonte de planeación (Kanda et al., 2008; Mohammadi Bidhandi et al., 2009). En las decisiones estratégicas el horizonte de planeación es a largo plazo, durante esta etapa se define la estructura de la cadena (diseño), la ubicación y las capacidades de producción, los productos que se fabricarán o almacenarán y el tipo de información que se utilizará. Las decisiones tácticas son a mediano plazo, durante esta etapa tiene lugar la planeación de la producción, la estimación de la demanda, la planeación de los inventarios, entre otras. Finalmente, las decisiones operativas tienen efecto a corto plazo,

durante esta etapa se toman las decisiones respecto a los pedidos, se establecen las fechas en que debe completarse el pedido, se generan listas de surtido en el almacén, se asignan los pedidos a los transportes y envío, se establecen los itinerarios de los pedidos; cuando se toman estas decisiones ya se han establecido tanto las políticas de planeación como la estructura de la cadena. El diseño, planeación y operación de la cadena de suministro tiene un fuerte impacto en la rentabilidad y éxito de la cadena.

Este trabajo está enfocado al estudio de un problema de apoyo a la decisión en el diseño y planeación de una cadena de suministro, en el que se contemplan problemas de selección de proveedores, localización de instalaciones, selección de medios de transporte y asignación de flujos y se contempla la optimización de ciertas medidas de desempeño.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El tema de estudio de este trabajo se centra en el apoyo a la decisión en el diseño y planeación de una cadena de suministro de tres niveles cuya red se compone de proveedores, plantas, bodegas, centros de distribución y canales de distribución organizados para adquirir materia prima convertirla en productos terminados y distribuirlos para satisfacer la demanda conocida de los centros de distribución, tal como se muestra en la figura 1.1.

Se asume que las decisiones que deben ser tomadas para el diseño y la planeación de la cadena de suministro son:

- De tipo estratégicas: qué proveedores serán seleccionados, qué plantas y bodegas serán abiertas, así como los tipos de medios de transporte a usar en los tres niveles de la cadena.
- De tipo tácticas: qué tipo de producto se va a manufacturar en cada planta abierta.

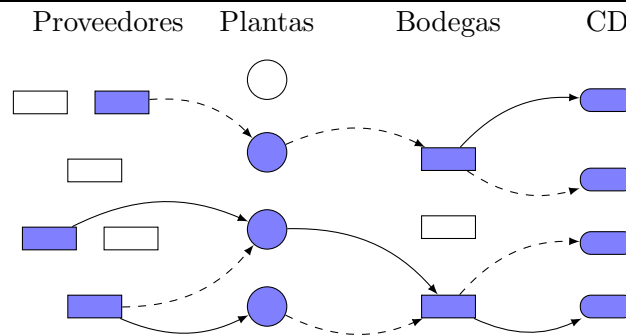


Figura 1.1: Cadena de suministro de tres niveles con diferentes tipos de medios de transporte.

- De tipo operativas: qué cantidad y tipo de materia prima se va a comprar a cada proveedor, cantidad de materia prima y productos a enviar entre proveedores - plantas, plantas - bodegas y bodegas - centros de distribución respectivamente.

La integración de estas decisiones es importante pues, por ejemplo, una vez que se construye una planta no se puede reubicar tan fácilmente. Lo mismo sucede al definir la capacidad de una planta o al escoger los proveedores o mercados que se atienden.

La integración de las decisiones estratégicas, tácticas y operativas ha sido poco tratada en la literatura. En Melo et al. (2009) se concluye que las decisiones tácticas y operativas en el manejo de las cadenas de suministro están lejos de ser integradas en las decisiones de diseño. Por esta razón, el problema bajo estudio se centra en desarrollar una metodología de apoyo a la decisión para el diseño y planeación de una cadena de suministro determinista, multiproducto y con múltiples medios de transportes desde una perspectiva dirigida a resultados (ver tabla ??), en la que se involucre el proceso de selección de proveedores en el diseño y planeación de la cadena. Al integrar el apoyo a la decisión en el diseño y planeación se desea ofrecer soluciones que satisfagan las preferencias del tomador de decisiones que representa los intereses, aspiraciones, políticas y estrategias de la empresa u organización y mantener la calidad dentro de la cadena.

1.2 HIPÓTESIS

El desarrollo de una metodología para el apoyo a la decision multicriterio que incorpora la selección de proveedores en la integracion del diseño y planeación desde una perspectiva orientada a resultados de una cadena de suministro determinista, multiproducto y con múltiples medios de transportes, facilita al tomador de decisiones identificar soluciones del problema que representan compromisos aceptables según sus preferencias.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Según Melnyk et al. (2010) los beneficios que ofrecen las tradicionales cadenas de suministro como reducir costos, entregas rápidas y una mejor calidad, ya no son suficientes en el mundo moderno. Las cadenas de suministro modernas deben ser acopladas de manera estratégica y con un valor agregado. En la actualidad las cadenas de suministro deben ser diseñadas y manejadas para entregar resultados específicos. Hay pocos trabajos que tratan de resolver los problemas de diseño y planificación de una cadena de suministro desde una perspectiva integrada, pero no toman en cuenta la selección de proveedores con múltiples criterios (Melo et al., 2009; Melnyk et al., 2010; Griffis et al., 2012; Maleki y Cruz-Machado, 2013).

Realizar el diseño y la planeación integrados de una cadena de suministro orientada a resultados, incorporando a los proveedores en el proceso, es un problema que no ha sido tratado antes en la literatura científica revisada.

Algunas ventajas de incorporar los proveedores en el proceso de la toma de decisiones en una cadena de suministro son (Araz y Ozkarahan, 2007):

- se pueden tener transacciones de compras a proveedores más eficientes
- se puede diseñar la colaboración y la coordinación con proveedores

- los contratos pueden permitir compartir el riesgo y las ganancias y se pueden conseguir precios menores que la competencia

Es importante definir los factores más relevantes al tomar decisiones relacionadas con proveedores. Los pasos principales para diseñar una estrategia de proveedores son: evaluar proveedores, escoger proveedores y negociar contratos, diseñar colaboración, aprovisionarse, planeación futura y análisis.

Típicamente las decisiones de diseño y planeación de una cadena de suministro se realizan de forma secuencial, lo que conlleva a soluciones suboptimales desde el punto de vista del costo total de la operación de la cadena de suministro (Olivares-Benitez et al., 2006).

El trabajo que se pretende realizar aún no ha sido abordado en la literatura científica revisada, no se conocen trabajos en los que se integre el apoyo a la decisión en el diseño y planeación desde una perspectiva orientada a resultados y que se integre la selección de proveedores como un problema multicriterio.

1.4 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de esta investigación doctoral es contribuir al estado del arte en la gestión de cadenas de suministro integrando el problema de diseño y planeación desde una perspectiva orientada a resultados.

Se consideran además los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión multicriterio que aborde la integración del diseño y planeación de la cadena de suministro.
- Construir un modelo matemático que represente el problema integrado de diseño y planeación de la cadena de suministro.
- Desarrollar un prototipo de sistema de apoyo a la decisión que implemente la metodología de apoyo a la decisión propuesta.

1.5 CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

Las contribuciones esperadas son:

- Una metodología integrada de apoyo a la decisión desde una perspectiva dirigida a resultados.
- Diseñar la solución al problema de selección de proveedores en un proceso de dos etapas: en la primera etapa realizar una evaluación de proveedores formulando un problema de ordenamiento multicriterio que permita hacer explícitas las preferencias del tomador de decisiones. En la segunda etapa integrar la evaluación de proveedores en el diseño de la red acorde a las condiciones generales del problema de optimización.
- Presentar un modelo matemático que resulte ser eficiente con instancias de la literatura para problemas relacionados y que puede servir para resolver problemas de mayor complejidad.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se desarrolla de la siguiente manera: en el capítulo 1, a manera de introducción se ha descrito y justificado el problema de estudio indicando los objetivos de la investigación y la contribución esperada. En el capítulo 2 se presenta el marco teórico relacionado al problema así como el estado del arte, seguido del planteamiento y metodología de apoyo a la decisión en el capítulo 3; en el capítulo 4 se muestra la experimentación y resultados y finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos bajo los cuales se sustenta el trabajo desarrollado, así como el estado del arte relacionado con el mismo. El capítulo es organizado de la siguiente manera: en la sección 2.1 se presenta el marco teórico relacionado con el proceso de toma de decisiones, seguido de clasificación de los problemas de decisión, (2.2), análisis de la decisión multicriterio (2.3), toma de decisiones bajo múltiples criterios (2.4), problemas de decisiones multiobjetivo (2.5) y medidas de desempeño (2.6), para terminar con los conceptos básicos de la perspectiva dirigida a resultados en las cadenas de suministro (2.7). En la sección 2.8 se presenta el estado del arte del apoyo a la decisión en las cadenas de suministro.

2.1 PROCESO DE TOMA DE DECISIONES

El proceso de toma de decisión consiste en elegir alternativas de un conjunto dado para lograr ciertas metas expresadas por el tomador de decisiones y que sean consistentes con su sistema de preferencias (Roy, 2005).

De acuerdo a Simon (1960) el proceso de toma de decisiones consiste en tres fases: fase de inteligencia, fase de diseño y la fase de elección.

La fase de inteligencia consiste en la identificación y estructuración del problema, definición de los objetivos, recopilación de datos. En la fase de diseño se construye y valida el modelo del problema es decir, se establecen los criterios de

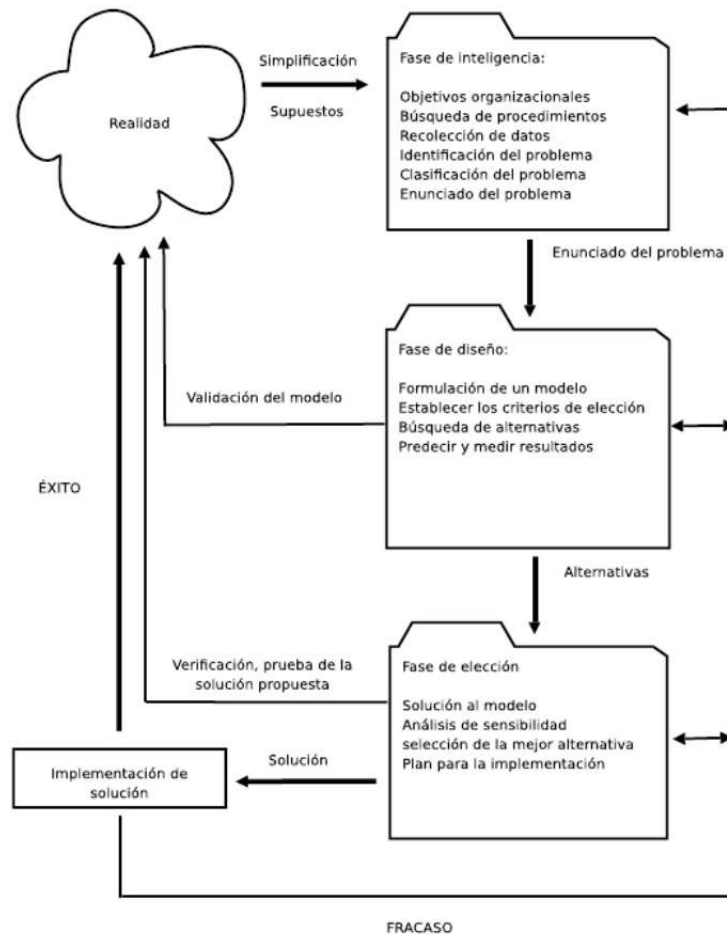


Figura 2.1: Proceso de toma de decisiones

evaluación, se buscan soluciones y se prueba la factibilidad de las soluciones. Y finalmente la fase de elección consiste en la búsqueda, evaluación y recomendación de una solución apropiada al modelo. En la figura 2.1 (tomada de Castro-Contreras (2007)) se esquematizan dichas fases.

Roy (1996) define el apoyo a la decisión como un amplio concepto que abarca todas las disciplinas relacionadas para ayudar a las personas a tomar decisiones, es decir, la ciencia de la decisión. La ciencia de la decisión trata de dar respuesta a tres preguntas fundamentales:

1. ¿cómo debería tomar decisiones una persona?
2. ¿cómo se toman las decisiones realmente?

3. ¿cómo se puede ayudar a las personas a mejorar sus decisiones?

De acuerdo a Bohanec (2003) la toma de decisiones se clasifica en dos tipos: toma de decisiones por máquinas y toma de decisiones por humanos. Esta última se realiza desde tres paradigmas: normativo, descriptivo y apoyo a la decisión (ver figura 2.2).

1. Normativo: incluye enfoques teóricos tales como teoría de la decisión, teoría de la utilidad multiatributo, entre otras.
2. Descriptivo: está relacionado con la psicología cognitiva, ciencias sociales y conductuales.
3. Apoyo a la decisión: conjunto de disciplinas relacionadas para ayudar a las personas a tomar decisiones.

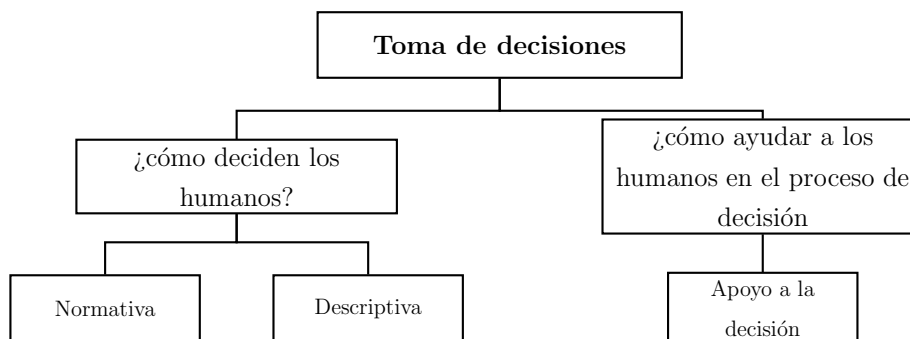


Figura 2.2: Rol del apoyo a la decisión.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE DECISIÓN

Los problemas de decisión se clasifican según su problemática, según la naturaleza de las consecuencias asociadas a las alternativas, según la cardinalidad del conjunto de alternativas y según la cantidad de tomadores de decisiones. A continuación se explican las características de cada una de las clasificaciones.

1. Según su problemática (Roy, 1996):

- Problemas de selección ($P.\alpha$): esta clase de problemas se presenta cuando el tomador de decisiones escoge las mejores alternativas de un conjunto en base a sus preferencias.
- Problemas de ordenamiento ($P.\beta$): esta clase de problemas se presenta cuando el tomador de decisiones asigna cada alternativa a una única categoría previamente definida. El tomador de decisiones realiza la asignación tomando en cuenta sus preferencias.
- Problemas de jerarquización ($P.\gamma$): esta clase de problemas se presenta cuando el tomador de decisiones ordena, según una relación de preferencia, las alternativas a través de una jerarquización.
- Problemas de descripción ($P.\delta$): esta clase de problemas se presenta cuando el tomador de decisiones desarrollar una descripción de cada alternativa y sus consecuencias en términos apropiados.

En la figura 2.3 se ilustra el resultado de cada tipo de problema.

2. Según la naturaleza de las consecuencias asociadas a las alternativas:

- Decisiones bajo certeza: el tomador de decisiones conoce por adelantado las consecuencias de su decisión.
- Decisiones bajo incertidumbre: el tomador de decisiones no conoce de antemano las consecuencias de elegir una alternativa, pero se conoce una distribución de probabilidad asociada a la ocurrencia de las consecuencias asociadas a la alternativa.
- Decisiones bajo estricta incertidumbre: el tomador de decisiones no tiene conocimiento sobre la ocurrencia de las consecuencias asociadas a la alternativa.

3. Según la cardinalidad del conjunto de alternativas:

- Finito: número pequeño.
- Infinito: número muy grande o infinito contable o infinito incontable.

4. Según la cantidad de tomadores de decisiones:

- Una sola persona: las decisiones recaen sobre una sola persona.
- Un grupo de personas: las decisiones son tomadas por dos o más personas.

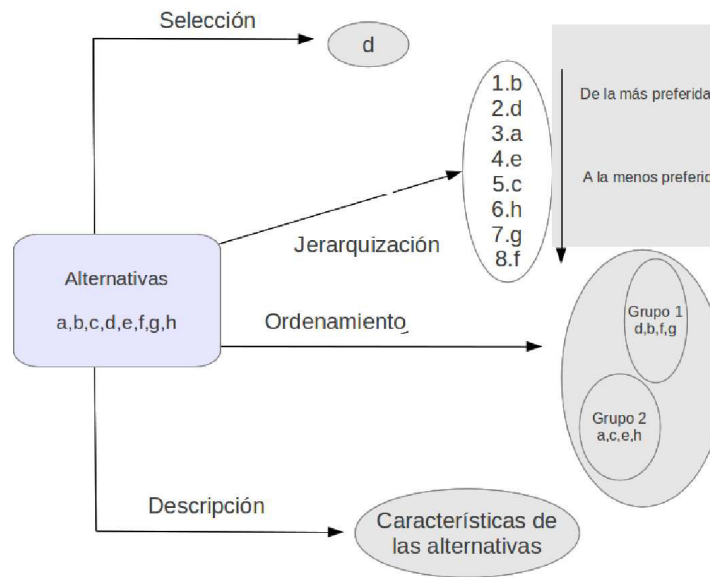


Figura 2.3: Clasificación de los problemas según su problemática.

2.3 ANÁLISIS DE LA DECISIÓN MULTICRITERIO

El análisis de la decisión multicriterio (en inglés: *Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA)*) es una subdisciplina de la investigación de operaciones que se relaciona estrechamente con las ciencias de la administración. El objeto de estudio del análisis de la decisión multicriterio es el desarrollo de metodologías para el apoyo a la decisión en problemas complejos de decisión bajo múltiples objetivos, criterios o metas y que están en conflicto (Zopounidis y Pardalos, 2010).

Entre otros aspectos *MCDA* se enfoca en (Zopounidis y Pardalos, 2010):

- La resolución de los conflictos que de manera natural aparecen entre los criterios.
- La modelación de las preferencias del tomador de decisiones.
- La identificación de soluciones de compromiso y el análisis de las consecuencias de soluciones multicriterio.
- El desarrollo de modelos de toma de decisiones.

Por otra parte Belton y Stewart (2002) afirman que *MCDA* ofrece vías para:

- Extraer valores, preferencias y hacerlas explícitas.
- Integrar datos de objetivos con preferencias y valores.
- Promover la comunicación a altos niveles y relacionarla con la decisión entre las partes interesadas.
- Facilitar que el proceso de decisión sea transparente y consistente.
- Actualizar decisiones previas cuando nueva información está disponible.

El análisis multicriterio de la decisión se ha usado con éxito en una gran variedad de situaciones de decisión: servicios públicos, transporte, logística, finanzas, etc, (Martinelli et al., 2014; Doukas, 2013).

2.4 TOMA DE DECISIONES BAJO CRITERIOS MÚLTIPLES

Un tomador de decisiones frecuentemente trata con problemas que involucran múltiples criterios, usualmente en conflicto. El proceso de toma de decisiones multicriterio (en inglés: *Multiple Criteria Decision Making (MCDM)*) se refiere a tomar decisiones de preferencia sobre un conjunto de alternativas que se caracterizan por múltiples criterios en conflicto (Yoon y Hwang, 1995). Los problemas de *MCDM* se caracterizan por tener:

- alternativas: un número finito de alternativas. El término alternativa es sinónimo de opciones, acciones o candidatos.
- múltiples criterios: cada problema tiene múltiples criterios, el número de criterios depende de la naturaleza del problema.
- unidades incommensurables: cada criterio tiene diferentes medidas de medición.
- atributos de peso: casi todos los métodos de *MCDM* requieren información con respecto a la importancia de cada criterio, la cual es generalmente proporcionada por una escala ordinal o cardinal. Los pesos pueden ser asignados directamente por el tomador de decisiones o pueden ser desarrollados por métodos (para más detalle de los métodos ver Yoon y Hwang (1995)).
- matriz de decisión: un problema *MCDM* puede ser expresado en una matriz, donde las columnas indican los criterios y los renglones las alternativas.

Existen varios métodos que se aplican para resolver problemas bajo múltiples criterios, entre los más importantes y utilizados se encuentran los *métodos Electre* (Elimination Et Traduisant la Réalité) (Roy, 1996). Estos métodos se crearon desde el centro Lamsade (Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision) de la Universidad de París IX desde el año 1968, en el que Bernard Roy y sus colaboradores desarrollaron el primer método *Electre*. Estos métodos básicamente consisten en un procedimiento para reducir el conjunto de soluciones eficientes. Tal reducción se realiza por medio de una partición del conjunto eficiente en un subconjunto de alternativas más favorables para el tomador de decisiones y en otro subconjunto de alternativas menos favorables.

Estos métodos introducen el concepto de *relación de sobreclasificación* (S). Una alternativa “*a*” sobreclasifica a otra “*b*” cuando, para los criterios considerados, el enunciado “*a*” es al menos tan buena como “*b*” es válido. La sobreclasificación se establece basándose en dos conceptos: concordancia y discordancia. El primero

cuantifica hasta qué punto, para un número elevado de criterios, una alternativa es preferida a otra; el segundo cuantifica hasta qué punto no existe ningún criterio para el cual una alternativa es mucho mejor que otra.

Otra forma de definir la relación de sobreclasificación S es a través de la definición de un "sistema relacional de preferencias" formado por cuatro relaciones fundamentales (Roy, 1996).

- **Indiferencia (I):** $a I b$ significa que existen razones claras y positivas para considerar que las alternativas son equivalentes. I es una relación simétrica
- **Preferencia estricta (P):** $a P b$ significa que existen razones claras y positivas para justificar que una de las dos alternativas (a) es significativamente preferida a la otra (b). P es una relación asimétrica.
- **Preferencia débil (Q):** $a Q b$ refleja una situación de duda entre $a P b$ y $a I b$. Es una relación asimétrica.
- **Incomparabilidad (R):** $a R b$ las alternativas son incomparables en el sentido que ninguna de las tres situaciones anteriores predomina.

Entonces, la equivalencia $a P b \vee a Q b \vee a I b \Leftrightarrow a S b$ sirve como definición de la relación de sobreclasificación S .

Note que:

$$\begin{aligned}
 a S b &\quad \wedge \quad b S a &\Leftrightarrow &\quad a I b \\
 a S b &\quad \wedge \quad b \text{ n} S a &\Leftrightarrow &\quad a P b \vee a Q P \\
 a \text{ n} S b &\quad \wedge \quad b \text{ n} S a &\Leftrightarrow &\quad a R b
 \end{aligned}$$

Existen varias versiones sobre los *métodos Electre* y el uso de cada uno de ellos depende de las características que presente el problema. En esta investigación nos enfocamos en el método *Electre Tri*, que es el que mejor se adapta a nuestro problema.

Método Electre Tri

ELECTRE-TRI es un método de asignación multicriterio. Permite la asignación de alternativas evaluadas para n criterios a categorías ordenadas y predefinidas. La figura 2.4 presenta diferentes categorías para los variados criterios y perfiles (g es la notación para el criterio, n el número de criterios). El límite entre dos categorías consecutivas, se formaliza mediante un perfil b . Cada categoría se define por dos perfiles: un perfil inferior y un perfil superior. Las categorías son mutuamente excluyentes: Una acción no se puede asignar a dos diferentes categorías. Con el fin de asignar cada alternativa a una categoría, se compara la alternativa con los perfiles.

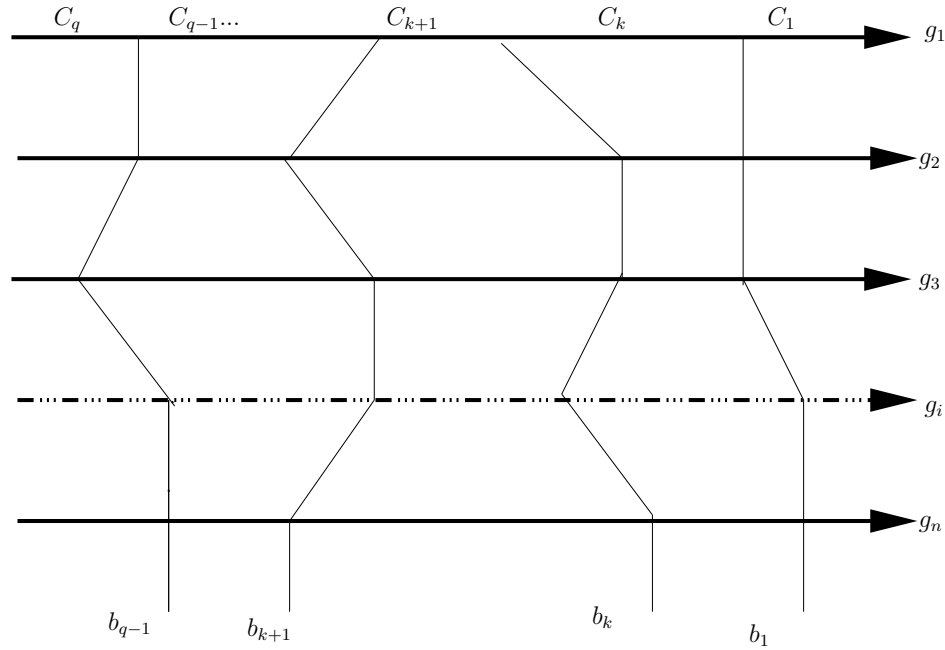


Figura 2.4: Perfiles

Esquemáticamente el método ELECTRE-TRI asigna las alternativas a las distintas categorías siguiendo dos pasos consecutivos:

1. La construcción de una relación de sobreclasificación S que caracteriza como las alternativas se comparan con los límites de la categoría.
2. La explotación de “S” con el fin de asignar alternativas a las categorías.

El método *Electre Tri* construye una relación de sobreclasificación S , expresada en qué medida un criterio apoya o se pone a la proposición de que una alternativa "a es al menos tan buena como b". Los umbrales de preferencia $p(b)$ y $q(b)$ constituyen la información de preferencia para cada criterio donde $p_j(b)$ representa la menor diferencia $g_j(a) - g_j(b)$ compatible con una preferencia de a en función del criterio g_j y $q_j(b)$ especifica la mayor diferencia $g_j(a) - g_j(b)$ que mantiene la indiferencia entre a y b para el criterio g_j .

Con el fin de validar la afirmación aSb o (bSa) , dos condiciones deben ser verificadas:

- concordancia: para que aSb ó bSa sea aceptado, una mayoría "suficiente" de criterios debe apoyar esta afirmación.
- discordancia: cuando se cumple la condición de concordancia ninguno de los criterios de la minoría se opone de manera significativa a la afirmación aSb ó bSa

En la construcción de la relación de sobreclasificación intervienen dos tipos de parámetros relacionados con los criterios:

- El conjunto de pesos de cada criterio (coeficientes de importancia de cada criterio (k_1, k_2, \dots, k_n) es usado en la prueba de concordancia como la relativa importancia de la unión de los criterios a favor de la afirmación aSb .
- El conjunto de umbrales de veto $V(v_1(b_h), v_2(b_h), \dots, v_m(b_h))$.

Para poder comparar una alternativa a con una alternativa de referencia b , el método ELECTRE TRI construye una relación de sobreclasificación. Para la construcción de esa relación se realizan los siguientes procesos:

1. Cálculo de los índices parciales de concordancia $c_j(a, b)$ y $c_j(b, a)$

2. Cálculo de los índices totales de concordancia $c(a, b)$
3. Cálculo de los índices parciales de discordancia $d_j(a, b)$ y $d_j(b, a)$
4. Establecimiento de relaciones de sobreclasificación valoradas a partir de los grados de credibilidad $S(a, b)$
5. Transformación de una relación de sobreclasificación

En cuanto al procedimiento de asignación existen, en este método, dos procedimientos para asignar una alternativa a a una de las categorías predefinidas, una vez que esta alternativa ha sido comparada con los perfiles de referencia. Estos dos procedimientos de asignación son los siguientes:

1. Procedimiento pesimista o conjuntivo compara a sucesivamente con los distintos perfiles b , es decir comenzando por los perfiles más altos, hasta encontrar aquel perfil b para el cual aSb . Una vez encontrado ese perfil, se asigna a a la categoría $C_h + 1$. Si b_{h-1} y b_h representan el perfil más bajo y el más alto, respectivamente de la categoría C_h , el procedimiento pesimista asigna a la alternativa a a esa categoría siempre que se cumpla que aSb .
2. Procedimiento optimista o disyuntivo) compara a sucesivamente con b , comenzando por los perfiles más bajos, hasta encontrar el perfil b para el cual bSa . Una vez encontrado el perfil que cumpla esa condición, se asigna a a la categoría C_h . Este procedimiento asigna a a la categoría más baja C_h para que el perfil b es preferido a a .

2.5 PROBLEMAS DE DECISIONES MULTIOBJETIVO

Los antecedentes y conceptos que se describen para el problema de toma de decisiones multiobjetivo (en inglés: *Multiple Objective Decision Making (MODM)*) fueron tomados de Ehrgott (2005) y Collette y Siarry (2003).

En general un problema de optimización multiobjetivo se describe como:

$$\begin{aligned} \min \quad & (f_1(x), f_2(x) \dots f_p(x)) \\ \text{sujeto a:} \quad & \\ & x \in \mathcal{X} \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ son las variables de decisión, \mathcal{X} es el conjunto de soluciones factibles, f_i es la i -ésima función objetivo.

En un problema multiobjetivo se tiene un conjunto de objetivos que deben ser minimizados simultáneamente, y por lo general los objetivos están en conflicto, es decir, a la mejora de uno se empeora otro. Por tal razón al optimizar el modelo no se llega a una solución óptima con respecto a todos los objetivos, sino a un conjunto de soluciones eficientes.

Para definir un problema de programación multiobjetivo es necesario especificar los siguientes componentes:

- conjunto factible \mathcal{X}
- vector de funciones objetivo $F = (f_1, f_2, \dots, f_p) : \mathcal{X} \longrightarrow \mathbb{R}^p$.
- espacio de objetivos \mathbb{R}^p
- conjunto ordenado (\mathbb{R}^p, \preceq)
- mapa del modelo θ

Los tres primeros puntos son los datos del problema, el mapa del modelo es el enlace entre el espacio objetivo y el orden del conjunto con el cual se define el significado de la minimización. Por lo tanto, para describir una clase de problemas de optimización multiobjetivo es necesario definirlo como:

$$(\mathcal{X}, F, \mathbb{R}^p) / \theta / (\mathbb{R}^p, \preceq) \tag{2.2}$$

En los problemas de optimización multiobjetivo, el significado de minimización es muy variado, para definirlo es necesario especificar un orden \preceq en \mathbb{R}^p .

En los problemas multiobjetivo no es posible encontrar una solución óptima, por lo tanto, el concepto de optimalidad se generaliza con la definición de orden de Pareto y es conocida como Pareto eficiente.

Definición 2.1 *Una solución $\hat{x} \in \mathcal{X}$ es eficiente o Pareto optimal si no existe otra solución $x \in \mathcal{X}$ tal que $f(x) \leq f(\hat{x})$. Si \hat{x} es eficiente, $f(\hat{x})$ es llamado punto no dominado.*

Definición 2.2 *El conjunto de todas las soluciones eficientes, $\hat{x} \in \mathcal{X}$ denotado por \mathcal{X}_E es llamado conjunto eficiente.*

Definición 2.3 *El conjunto de todos los puntos no dominados $\hat{y} = f(\hat{x})$ donde $\hat{x} \in \mathcal{X}_E$ se denota por \mathcal{Y}_N .*

Definición 2.4 *Una solución factible $\hat{x} \in \mathcal{X}$ es llamada débilmente eficiente si no existe una $x \in \mathcal{X}$ tal que $f(x) < f(\hat{x})$, es decir, $(f_k(x) < f_k(\hat{x})) \forall k = 1, \dots, p$. El punto $\hat{y} = f(\hat{x})$ es llamado débilmente no dominado.*

Existen diversos métodos de solución para resolver problemas de optimización multiobjetivo, los más conocidos son el de sumas ponderadas, método lexicográfico y el método de ϵ -restricción. Este último es el que usaremos en esta investigación.

Método de ϵ -restricción

El método de ϵ -restricción consiste particularmente en transformar un problema multiobjetivo en un problema monobjetivo agregando restricciones adicionales. El procedimiento consiste en:

1. seleccionar entre todos los objetivos, qué objetivo se va a optimizar.

2. seleccionar un vector de valores iniciales para ϵ para las restricciones adicionales.
3. transformar el problema multiobjetivo en monobjetivo conservando como objetivo la función objetivo seleccionada en el punto uno y agregar los otros objetivos como restricciones adicionales.

El modelo multiobjetivo (2.1) se transforma en el modelo monobjetivo-restringido como:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f_j(x) \\
 \text{sujeto a:} \quad & \\
 & x \in \mathcal{X} \\
 & f_k(x) \leq \epsilon_k \quad k = 1, \dots, p, k \neq j
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Este método presenta ventajas y desventajas al usarlo en los problemas multiobjetivos:

■ **Ventajas**

- Es un potente generador de puntos eficientes.

■ **Desventajas**

- El cálculo adecuado del rango de las funciones objetivo sobre el conjunto eficiente suele ser muy costoso en tiempo y recursos de cómputo
- Solo genera soluciones eficientes cuando las restricciones se satisfacen como igualdad.
- Genera soluciones débilmente eficientes.
- No asegura encontrar todas los puntos del frente de Pareto.
- El tiempo de solución puede aumentar cuando se incrementan los objetivos.

En el campo científico tales desventajas han dado pie a mejoras del método. Entre las mejoras, podemos encontrar:

- Un cálculo más aproximado del rango del parámetro ϵ , usando optimización lexicográfica.
- Garantía de soluciones eficientes (agregando variables de holgura en las restricciones como en la función objetivo).
- Aceleración del algoritmo identificando soluciones no factibles.

Para mayor detalle de las mejoras del método ϵ -restricción véase (Mavrotas, 2009).

MÉTODO AUGMECON2

El método de *Augmecon2* (Mavrotas, 2009) está basado en el método de ϵ -restricción y el propósito de su desarrollo ha sido eliminar las desventajas presentes en este último. Para ello se introduce optimización lexicográfica en el cálculo de la tabla de cotas (en inglés: payoff), para garantizar que las soluciones que se obtienen sean eficientes. El algoritmo general es muy parecido al algoritmo de la ϵ -restricción, en la figura 2.5 se presenta el método.

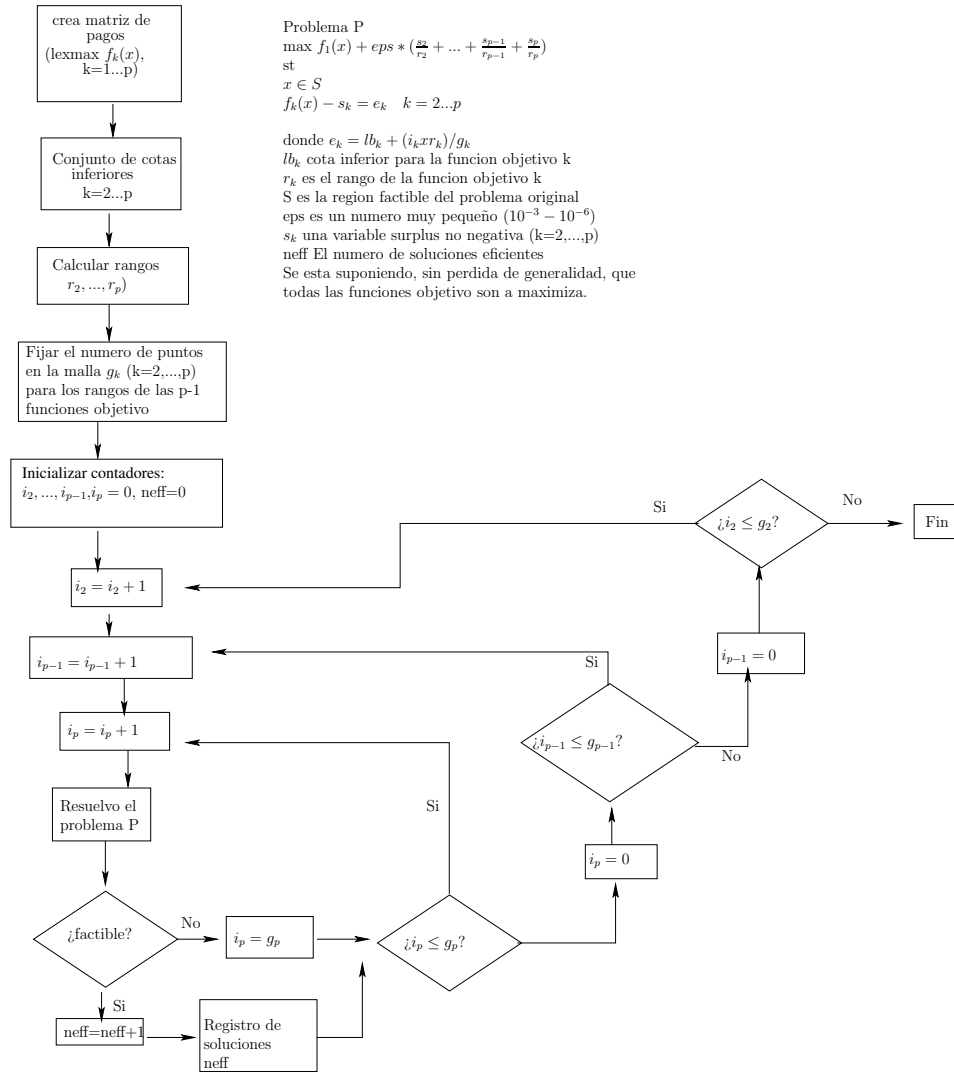


Figura 2.5: Método Agmecon2

2.6 MEDIDAS DE DESEMPEÑO

En optimización multiobjetivo existen diversas métricas que permiten evaluar la calidad del frente obtenido. Para diseñar una métrica eficiente para una comparación de métodos multiobjetivo se suelen considerar tres cuestiones.

- Minimizar la distancia entre el frente de Pareto aproximado, el cual fue produ-

cido por el algoritmo que se propone, respecto al frente de Pareto verdadero. Esto, suponiendo que se conoce el frente exacto.

- Maximizar la distribución de las soluciones encontradas. De esta forma, se busca obtener una distribución de soluciones no dominadas lo más suave y uniforme posible.
- Maximizar la cantidad de elementos del conjunto de Pareto encontrado.

Sin embargo, una métrica que satisfaga de manera óptima los tres elementos anteriores es inexistente (Knowles y Corne, 2001). Por lo anterior se recomienda utilizar más de una métrica para evaluar el desempeño de un algoritmo. En nuestro caso utilizaremos métricas de puntos en el frente de Pareto, hipervolumen y cobertura, que son de las más populares.

- Número de puntos en el frente
- Medida de hipervolumen S
- Medida de cobertura entre dos conjuntos, $C(A, B)$, también denotada como la métrica C

Número de puntos en el frente

Esta medida es fácil de implementar y se refiere a la capacidad del algoritmo de encontrar puntos eficientes. Es una medida importante, ya que las fronteras eficientes que proveen más alternativas para el centro decisor son preferibles que las fronteras con pocos puntos eficientes.

Medida de hipervolumen

El hipervolumen o métrica S calcula el hipervolumen de la región multi-dimensional encerrada por un conjunto no dominado A y un “punto de referencia” calculando el

“tamaño” de la región que es dominada por A . Esta medida es independiente (aunque requiere que un punto de referencia sea seleccionado), luego induce un ordenamiento completo y es no-cardinal. En la figura 2.6 se observa que el valor relativo de la métrica S depende de la selección del punto de referencia. En la mitad superior, se muestran dos conjuntos no dominados, A y B , con $S(A) > S(B)$. En la mitad inferior los mismos conjuntos tienen ordenamiento diferente en S .

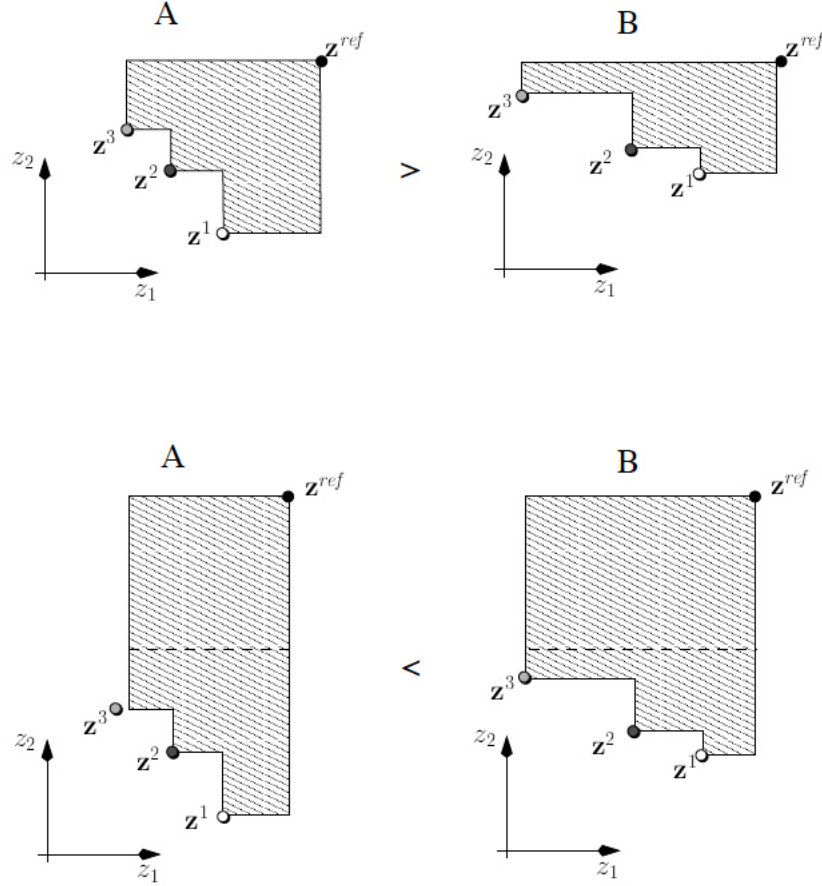


Figura 2.6: Métrica de hipervolumen

Medida de cobertura entre dos conjuntos, $C(A, B)$

Sean A, B dos conjuntos de vectores. La métrica C mapea el par ordenado (A, B) en el intervalo $[0, 1]$:

$$C(A, B) = \frac{|\{b \in B | \exists a \in A : a \preceq b\}|}{|B|} \quad (2.4)$$

El valor $\mathcal{C}(A; B) = 1$ significa que todos los vectores de decisión en B son débilmente dominados por A . Lo opuesto $\mathcal{C}(A; B) = 0$, representa la situación cuando ninguno de los puntos de B son débilmente dominados por A . Note que siempre ambos ordenamientos deben ser considerados, ya que $\mathcal{C}(A; B)$ no es necesariamente igual a $1 - \mathcal{C}(B; A)$. \mathcal{C} es una medida cardinal.

Si ambas métricas establecen un nivel de dominancia de un subconjunto A sobre un subconjunto B , y además $\mathcal{C}(B, A) \ll \mathcal{C}(A, B)$ entonces se puede concluir que el subconjunto A no es dominado por el subconjunto B . Y en dependencia de los valores arrojados por las métricas será mayor la percepción de que A domina a B .

2.7 CADENAS DE SUMINISTRO CON ORIENTACIÓN A RESULTADOS

Como se indica en Melnyk et al. (2010) los beneficios que ofrecen las tradicionales cadenas de suministro como la reducción de costos, entregas más rápidas y una mejor calidad no son suficientes para competir en el mundo moderno. Los mismos autores mencionan que anteriormente las cadenas de suministro eran desacopladas e impulsadas por el precio, actualmente las cadenas son acopladas e impulsadas por el valor. Una tendencia que está tomando auge dentro del campo de las cadenas de suministro es la dirigida a resultados (en inglés: *outcome-driven* Melnyk et al. (2010)). Esta tendencia consiste en tomar en cuenta seis puntos básicos para obtener una cadena competitiva.

A continuación se explica cada uno de estos seis puntos, los objetivos que persiguen y lo que se desea alcanzar para cada uno de ellos.

Costo: tiene como objetivo reducir el costo de producción, asegurar entregas puntuales y fiables, manteniendo la calidad. Para llegar a obtener este resultado se debe: reducir el uso de holgura en estas tres formas: inventario, tiempo de espera

y capacidad, estandarización de productos y procesos donde sea posible, enfatizar en la reducción de desperdicios y diferencias a través de la cadena de suministros y diseñar la cadena de suministro modular, involucrando una interacción e integración cercana con los clientes inmediatos y proveedores principales (se espera que otros proveedores administren sus propios proveedores).

Grado de reacción: Responder rápidamente a los cambios en la demanda (volumen, mezcla, ubicación) con un costo razonable. Para conseguir esto es necesario enfocarse en los enlaces de información cercana con clientes y proveedores críticos para monitorear la demanda, facilitar/mejorar el pronóstico y monitorear el estado del suministro, en el exceso de capacidad -redundancia- en la cadena de suministro (especialmente en el lado contrario), en la planeación del suministro para incluir no solo la capacidad de producción sino también la capacidad logística, en los proveedores precalificados, tener énfasis en producción de lotes pequeños, ampliar el desarrollo de proveedores y sistema de evaluación de proveedores y en los sistemas de información para coordinar los flujos de producción/información.

Seguridad: Asegurar que las provisiones que vienen a través de la cadena de suministro estén protegidas de alteraciones debido a amenazas externas y proteger la integridad del producto y su consistencia. Para lograr la seguridad de la cadena se enfatiza en la visibilidad y transparencia, dado a través de sistemas de información integrados (o, en casos extremos, integración vertical) a lo largo de la cadena de suministro, en la redundancia de recursos en caso de un problema con un proveedor, en el número limitado de socios (menos puntos de oportunidad/entrada para una posible amenaza), en el mapeo de la cadena de suministro para identificar posibles puntos débiles, en la planeación y administración completa e integrada de la cadena de suministro y enfatizar en el control a través de la certificación, auditorías exhaustivas u otros medios.

Sustentabilidad: Ofrecer productos a través de una cadena de suministro que asegure un impacto controlado y mínimo de recursos, tanto hoy como en el futuro. Básicamente implementar y mantener una perspectiva de reciclaje (*en inglés:*

cradle to cradle). Para lograr esto es necesario tener una visibilidad/transparencia durante toda la cadena de suministro para asegurar que todos los miembros están conscientes de amenazas u oportunidades, tener un mayor énfasis en el diseño de producto, proceso y empaque, tener una planeación y administración integrada de la cadena de suministro, reconociendo que la cadena de suministro debe comenzar con la extracción de recursos y terminar con la eliminación/renovación de productos, un uso de sistemas más amplios de medición de desempeño y medidas (costo total del propietario), una amplia precalificación y evaluación de proveedores para asegurar que son seleccionados los proveedores correctos y que entienden lo que se requiere, un amplio uso de estándares de auditorías y certificación en toda la cadena de suministro (ISO 14001) y la introducción de sistemas para la recuperación de productos (logística inversa) y comercialización de residuos.

Elasticidad: este punto se centra en desarrollar un sistema que pueda identificar, monitorear y reducir los riesgos e interrupciones en la cadena de suministro, además de reaccionar rápidamente y ser rentable y ofrecer tranquilidad al cliente crítico. Para lograrlo es necesario enfatizar en la visibilidad y transparencia, proporcionado a través de sistemas de información integrados (o en casos extremos, integración vertical) en toda la cadena de suministro. Aceptar la necesidad de exceso de recursos (inventario, capacidad, tiempo de espera), un mapeo de la cadena de suministro para identificar posibles puntos débiles y planeación y administración integrada, tener un enfoque en posibles amenazas no solo para los proveedores sino también para los vínculos logísticos, contar con proveedores precertificados/precalificados y tener un uso amplio de planeación de contingencias (análisis *What if*).

Innovación: Ofrecer a los clientes críticos una corriente de productos y servicios que no solo son nuevos sino también se dirigen a las necesidades que los competidores han descuidado o no atendieron bien, así como ofrecer nuevas formas de producir, entregar o distribuir productos. En este sentido es necesario un desarrollo y protección de la propiedad intelectual, debido a la cooperación con clientes clave, tener una presencia deliberada de excedente de recursos, ver a los proveedores como

fuentes de innovaciones cercanos para resolver problemas en otros mercados pero que tienen que ser refinadas antes de que puedan usarse para afrontar las necesidades actuales de los clientes, tener una integración cercana, especialmente con clientes y proveedores críticos, con el fin de innovar en conjunto y sobre todo tener un apoyo de una amplia gama de diferentes perspectivas y soluciones, anular, en etapas tempranas del desarrollo del producto, métricas de desempeño específicas con el fin de no reprimir la innovación y ofrecer una amplia gama de estructuras de la cadena de suministro que van de lo puramente modular a puramente integradas, dependiendo del tipo de innovación que se persigue.

Algunos de estos resultados pueden mezclarse con eficacia, mientras que otros es difícil mantenerlos equilibrados. Por ejemplo, mantener la innovación afecta el resultado de costo, pero no quiere decir que no se pueda tener ambos resultados, es posible siempre que se busque mantener un equilibrio entre ambos.

2.8 ESTADO DEL ARTE

2.8.1 APOYO A LA DECISIÓN EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO

En Mula et al. (2010) se presenta una extensa revisión bibliográfica de los problemas de administración de las cadenas de suministro. Los artículos revisados los clasifican según la estructura de la cadena, tipo de decisiones tomadas, el enfoque del modelado, propósito, tipo de información, limitaciones, novedad y aplicaciones. De los 44 artículos que revisaron los autores, con respecto a las decisiones tomadas en la cadena, 32 toman sólo decisiones tácticas, 2 toman decisiones operativas, 4 combinan decisiones estratégicas y tácticas, 3 combinan decisiones estratégicas y operativas y 3 combinan las tácticas y operativas. Ninguno combina los tres tipos de decisiones. Con respecto al enfoque del modelado, 6 artículos son modelados con programación lineal, 22 artículos con programación lineal entera mixta, siete de veintidós 7/22 artículos también son modelados con heurísticas, uno con programación no lineal, uno con programación no lineal entera mixta, solo 6 artículos son multiobjetivo, 1/6

se aplican heurística, dos de seis 2/6 también con programación fuzzy y 4 son modelos híbridos.

Dentro de una cadena de suministro son múltiples las decisiones que se deben tomar y cada una de estas decisiones afecta el comportamiento de la misma (Shankar Latha et al., 2013). La investigación sobre decisiones en la cadena de suministro es amplia; en la literatura se encuentran trabajos sobre selección de proveedores, localización de instalaciones, planeación de la manufactura, planeación de transportes, planeación de la distribución y algunas otras más.

La selección de proveedores es un factor importante para el buen funcionamiento de cualquier cadena de suministro (Chen, 2011). Los proveedores tienen un directo y significativo impacto en la calidad, costos y tiempos de entrega de los productos procesados y del buen funcionamiento de la cadena. Los proveedores son el primer eslabón de la cadena, seleccionar los proveedores es una tarea complicada, debido a que interfieren muchos criterios que están en conflicto, por ejemplo, el proveedor que ofrece el mejor precio no necesariamente es el proveedor que ofrece la mejor calidad o el mejor tiempo, por lo que resulta conveniente formular este problema como un problema de decisión multicriterio (Luo et al., 2009).

Para garantizar el éxito de la selección de proveedores es muy importante determinar cuidadosamente los criterios de evaluación que se ajusten a las estrategias y objetivos que se desean alcanzar y revisar estos criterios continuamente de forma que puedan ser actualizados. En Ho et al. (2010) los autores muestran que el criterio con mayor popularidad es calidad, seguido de tiempo de entrega, costo, capacidad de manufactura, servicio, etcétera. En la tabla 2.1 se muestran los criterios más relevantes.

Los investigadores han trabajado con cada uno de estos criterios. Por ejemplo Talluri et al. (2006) consideran los criterios de calidad, tiempo de entrega y costos, para hacer la selección de proveedores en una industria farmacéutica; Wu et al. (2007) aplican los criterios de satisfacción y costo para la selección de proveedores

Prioridad	Criterio	Prioridad	Criterio
1	calidad	8	investigación y desarrollo
2	tiempo de entrega	9	finanzas
3	precio /costo	10	flexibilidad
4	capacidad de manufactura	11	reputación
5	servicio	12	afinidad
6	administración	13	riesgo
7	tecnología	14	seguridad y medio ambiente

Tabla 2.1: Jerarquización de los criterios de evaluación

en la manufactura de electrónicos de aviación.

En la literatura hay varias técnicas de MCDM que se han aplicado para abordar el problema de selección de proveedores que van desde los procesos analíticos jerárquicos (AHP), procesos de redes analíticas (ANP), análisis de redes envolventes de datos (DEA), teoría de conjuntos difusos, algoritmos genéticos (GA), programación matemática, entre otros. En la tabla 2.2 tomada de la revisión de Ho et al. (2010) se presenta la cantidad de trabajos que han utilizados los diferentes enfoques.

Enfoque	No. de artículos	Enfoque	No. de artículos
Análisis envolvente de datos (DEA)	14	Proceso de análisis jerárquico (AHP)	7
Programación matemática	9	Teoría de conjuntos difusos	3
Razonamiento basado en casos (CBR)	7	Técnica de clasificación simple de atributos múltiples SMART	2
Proceso de redes analíticas (ANP)	3	Algoritmos genéticos (GA)	1

Tabla 2.2: Principales enfoques individuales

Por mencionar algunos, Liu et al. (2000) proponen un DEA para evaluar los rendimientos globales de los proveedores y de esta manera reducir el número de

proveedores que puedan ser seleccionados. Ng (2008) desarrolla un modelo lineal utilizando sumas ponderadas para la selección de proveedores con el objetivo de maximizar la calificación de los proveedores. Talluri y Narasimhan (2005) desarrollaron un modelo lineal entero mixto para evaluar y seleccionar a los proveedores con respecto a las fortalezas de los proveedores existentes y excluir aquellos de bajo rendimiento de una empresa de telecomunicación. Los resultados obtenidos se compararon con el tradicional DEA y se analizaron sus ventajas. En Wadhwa y Ravindran (2007) los autores modelan la selección de proveedores como un problema de programación multiobjetivo, los objetivos que presentan son minimizar costos, tiempo de entregas y rechazos. Tres enfoques de solución son aplicados: método de sumas ponderadas, programación por metas y programación compromiso, y se compararon las soluciones encontradas con cada uno.

Hasta el momento el único trabajo que hemos encontrado donde el problema de selección de proveedores es modelado como un problema de ordenamiento es el que presentan Araz y Ozkarahan (2007) donde presentan la selección de proveedores usando el método PROMETHE. A través de un ejemplo los autores muestran que la metodología que proponen es flexible y responde como herramienta para la toma de decisiones. La principal diferencia entre los trabajos mencionados y el nuestro, es que ellos no integran la selección de proveedores en el diseño y planeación de la cadena, sino que lo hacen de manera separada.

Atendiendo la clasificación que se muestra en la subsección 2.2, para fines de nuestro problema nos interesan los problemas de selección de proveedores modelados como problemas de ordenamiento multicriterio e integrados en el diseño y la planeación de cadenas de suministro.

El problema de integrar la selección de proveedores como parte del diseño de la cadena de suministro es escaso en la literatura, como mencionan Meixell y Gargeya (2005); Melo et al. (2009); Feng et al. (2011); Griffis et al. (2012); Maleki y Cruz-Machado (2013). Existen muy pocos trabajos que integren la selección de proveedores en el diseño y/o la planeación de la cadena de suministro. En Cordeau et

al. (2006, 2008) se considera que los proveedores han sido pre-seleccionados de algún modo y se considera el costo de la materia prima como criterio para seleccionarlos en el diseño y planeación de la cadena. En Amin y Zhang (2012) se propone una metodología para integrar la pre-selección y selección de proveedores en el diseño y la planeación de una cadena de suministro, sin embargo ellos implementan la pre-selección como un problema de jerarquización multicriterio que tiene la desventaja de que los criterios de jerarquización son únicamente válidos en el contexto del conjunto de proveedores considerados. Shankar Latha et al. (2013) abordan el problema de diseño y planeación integrado de una cadena de suministro compuesta de proveedores, plantas, centros de distribución y zonas de clientes, emplean un algoritmo genético biobjetivo para resolver el problema, sin embargo, solo consideran un producto y no consideran medios de transporte.

Hay pocas contribuciones que propongan modelos multiobjetivo. En la revisión hecha por Melo et al. (2009) solo el 9 % de los artículos revisados consideran múltiples objetivos. Aparte de los objetivos económicos (minimizar costos y maximizar ganancias), otros objetivos que se han estudiado son la minimización de entregas tardías y la maximización de la tasa de servicio (fill rate). Por ejemplo, Altıparmak et al. (2006) consideran tres objetivos en conflicto: la minimización de los costos totales, la maximización de la demanda total que puede ser satisfecha dentro de un límite de tiempo predeterminado, y la maximización de una distribución equilibrada de las capacidades de las instalaciones abiertas. Sabri y Beamon (2000) consideran como objetivos minimizar los costos, las tasas de servicio y la flexibilidad. Erol y Ferrrell Jr. (2004) minimizan costos y maximizan el nivel de satisfacción de los clientes. Guillen et al. (2005) tienen como objetivos maximizar las ganancias y maximizar el nivel de satisfacción de los clientes. Se han encontrado dos trabajos en los que se consideran el costo y el tiempo máximo de traslado en la cadena como objetivos (Cardona-Valdes et al., 2011; Olivares-Benitez et al., 2006), sin embargo en estos dos trabajos se abordan cadenas de suministro de dos niveles, no incluyen la selección de proveedores y consideran un solo producto.

Melo et al. (2009) concluyen que las decisiones de planeación y operación en el manejo de las cadenas de suministro están lejos de ser integradas en las decisiones de diseño. Y en los pocos trabajos que incluyen estos aspectos se simplifican considerablemente (por ejemplo, un solo producto o un solo nivel de localización), evaluación que es hecha también por Mula et al. (2010). Melo et al. (2009) también muestran un estudio detallado en el que se destaca el vínculo existente entre los problemas de ubicación de instalaciones y los relacionados al diseño de cadena de suministro, aunque los primeros han sido estudiados mayormente, los segundos son aún más complejos porque involucran problemas como el abastecimiento de material, producción, distribución y ruteo, entre otros, los cuales también deben considerarse. La mayoría de los trabajos que integran actividades de la cadena de suministro se centran en la integración entre el diseño de la cadena y la planeación de la operación (ver Cardona-Valdes et al. (2011); Olivares-Benitez et al. (2006); Cordeau et al. (2006))

Como plantea Sezen (2008) existen actualmente pocas publicaciones que aborden el problema del diseño de una cadena de suministro de manera satisfactoria, esto es que tomen en cuenta los tres factores más importantes en el diseño de una cadena de suministro: evaluación y selección de proveedores, factores de localización y rendimiento de la manufactura. Una de las pocas publicaciones que incluye estos tres factores del diseño es Cordeau et al. (2006) en donde se plantea además la integración con decisiones de planeación operativa, aunque no se toma en cuenta la evaluación de proveedores y no incluye decisiones de manufactura. Amin y Zhang (2012) es otra publicación en la que se toman en cuenta los tres factores de diseño antes mencionados, pero considera una cadena de suministro cerrada conectando proveedores con productores y sitios de remanufactura. Mohammadi Bidhandi et al. (2009) es otra publicación en la que se aborda el problema integrado de diseño y la planeación operativa de una cadena de suministro, sin embargo, Mohammadi sigue el enfoque de Cordeau por lo que su modelo tiene las mismas limitaciones. En Shankar Latha et al. (2013) consideran una cadena de tres niveles, e integran diseño y planeación de la operación, sin embargo, no consideran evaluación de proveedo-

res y únicamente tienen en cuenta el costo de las materias primas para seleccionar proveedores. Aunque Latha presenta un modelo matemático, utiliza un algoritmo genético con el que resuelven instancias pequeñas.

Además de los trabajos mencionados se han encontrado otros similares (Mirzapour Al-e hashem et al., 2011; Pimentel et al., 2013; S. Kadadevaramath et al., 2012; Olivares-Benitez et al., 2013) que abordan el problema integrado del diseño y la planeación operativa de una cadena de suministro, estos presentan al menos alguna de las limitaciones mencionadas en las publicaciones de trabajos integrados mencionados en el párrafo anterior.

Acorde a la literatura revisada sobre el diseño y la planeación operativa de cadenas de suministro, se puede considerar que la investigación sobre la integración de estas dos actividades está aún en un nivel muy incipiente y básico. Además el problema de diseño de cadenas de suministro dista de estar resuelto desde un enfoque científico, ya que las pocas publicaciones que se relacionan con este problema no llegan a incorporar de forma satisfactoria los tres factores claves del diseño planteados por Sezen (2008).

En la vida cotidiana, la mayoría de los problemas son de naturaleza multicriterio. La solución de los problemas multicriterio no solo depende de los datos involucrados, sino también de las preferencias del tomador de decisiones. Los problemas multicriterio no se pueden tratar sin la información adicional relacionada con las preferencias y las prioridades de los tomadores de decisiones (Brans y Mareschal, 2005).

El éxito de una cadena de suministro depende en gran medida de la buena planeación y organización de todos sus componentes. Por tal motivo, es importante que todos los componentes de la cadena estén organizados y adaptados a las necesidades de las mismas.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En este capítulo se presenta a detalle el planteamiento del problema así como la metodología de apoyo a la decisión propuesta.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cadena de suministro bajo estudio es de tres niveles, tal y como se muestra en la figura 1.1. Dicha cadena se compone de un conjunto potencial de proveedores, un conjunto potencial de plantas, un conjunto potencial de bodegas y un conjunto de centros de distribución. A través de la cadena se distribuyen materias primas y productos terminados. En el primer nivel (proveedores - plantas) los proveedores envían diferentes materias primas hacia las plantas; en las plantas las materias primas son manufacturadas para crear productos terminados. En el segundo y tercer nivel (plantas - bodegas, bodegas - centros de distribución respectivamente) se envían productos terminados. El envío de las materias primas y productos puede hacerse a través de diferentes medios de transporte. Para cada par origen-destino en cada nivel de la cadena de suministro se conoce el costo y tiempo de transportes. Así como la capacidad parcial para cada materia prima o producto en cada medio de transporte.

Con los conjuntos potenciales de plantas y bodegas se tiene que determinar cuántas y cuáles de estas abrir. Cada planta tiene un costo fijo por abrirse y una

capacidad limitada para manufacturar los productos. Se está suponiendo que en cada planta se puede manufacturar cualquier producto y se conoce el costo y tiempo de manufactura de cada producto en cada planta. Las bodegas también presentan un costo fijo por abrirse y una capacidad limitada para recibir cualquier producto. De cada centro de distribución se conoce la demanda por producto.

Como se ha planteado en el capítulo de introducción el problema científico que se aborda en este trabajo se resume en: desarrollar una metodología de apoyo a la decisión multicriterio para diseñar y planear, de forma integrada, una cadena de suministro desde una perspectiva orientada a resultados ?? y que incluya el proceso de selección de proveedores. Esto implica integrar la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas, mismas que se traducen en:

- Qué proveedores formarán parte del diseño de la cadena
- Cuál proveedor enviará cuáles materias primas a qué plantas y por cuáles medios de transporte
- Cuáles plantas y bodegas se abrirán
- Qué productos se van a manufacturar en cada planta abierta
- Cuál planta envía a qué bodega, cuáles productos y por cuáles medios de transporte
- Qué bodega enviará a qué centro de distribución y por cuáles medios de transporte

Estas decisiones se asocian a problemas de decisión como localización (de plantas y bodegas), optimización de flujos (materias primas y productos) y selección (medios de transporte y proveedores).

En este trabajo se propone resolver estos problemas de forma integrada, para lo cual se ha propuesto una metodología de apoyo a la decisión que se presenta en la siguiente sección.

3.2 METODOLOGÍA DE APOYO A LA DECISIÓN

Una metodología de apoyo a la decisión es un conjunto de axiomas, reglas, métodos, procedimientos, que son desarrollados para ayudar al tomador de decisiones durante todas las etapas del proceso de decisión. El propósito de la metodología de apoyo a la decisión es garantizar que el proceso de decisión sea realizado por el tomador de decisiones de forma eficiente, eficaz y racionalmente.

En este trabajo se propone una metodología de apoyo a la decisión desarrollada en tres fases: fase I o fase de evaluación de los proveedores, fase II o fase de optimización y fase III o fase de selección. En la figura 3.1 se esquematiza la metodología a la par de las fases con la toma de decisiones, las cuales se explicaron en la sección 2.1.

La selección de proveedores es una actividad de importancia estratégica para la cadena de suministro (Gryna et al., 2007) y por demás compleja ya que en la evaluación de los proveedores intervienen objetivos diferentes asociados a la necesidad de garantizar que los proveedores seleccionados estén alineados con la visión estratégica y las políticas de la empresa y garanticen el cumplimiento de objetivos económicos y/o tácticos, como por ejemplo la minimización del costo de operación o de los tiempo de entrega.

La dificultad de cumplir con estos dos propósitos estriba en que, por una parte, garantizar la alineación de los proveedores con la empresa se puede llevar a cabo antes de realizar el diseño o la planeación de la red; mientras que garantizar el cumplimiento de los objetivos económicos solo se puede realizar de manera simultánea o posterior al diseño de la red. Es por ello que en la metodología se han separado estas dos actividades en fases diferentes: la actividad 1) se ha propuesto se realice en la fase I, mientras que la actividad 2) se ha propuesto se realice en la fase II. Esta separación permite la aplicación de medidas correctivas a aquellos proveedores que no han logrado una evaluación satisfactoria, pero que se considera que están muy

cerca de lograrlo y que vale la pena someterlos a un nuevo proceso de evaluación antes de hacer la evaluación definitiva.

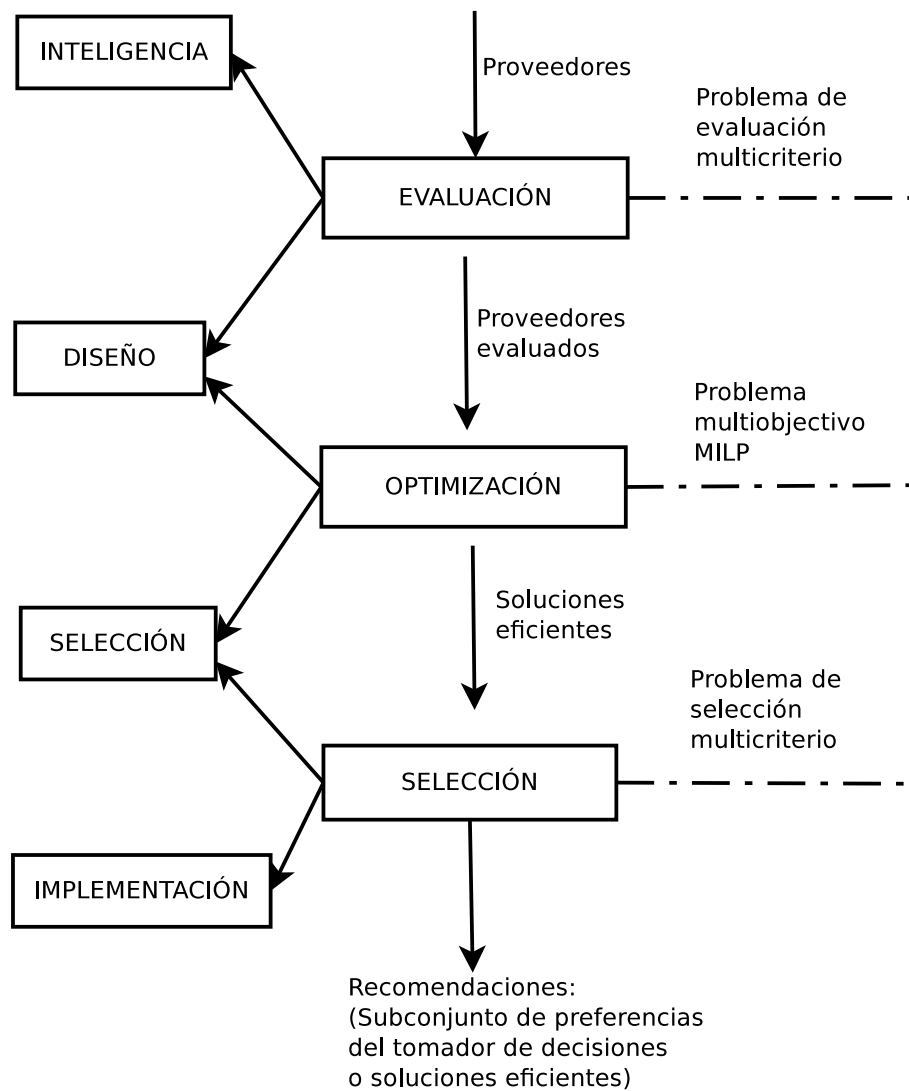


Figura 3.1: Metodología propuesta

3.2.1 FASE I O PRE-SELECCIÓN DE PROVEEDORES

En esta fase se aborda la evaluación de los proveedores como un problema de evaluación multicriterio, ya que, el problema de evaluación multicriterio es el único tipo de problema de decisión que emplea información global de preferencias (independiente de las alternativas). Esta es una característica que es necesaria para

garantizar la transparencia en el proceso de evaluación de los proveedores (representación explícita de los requerimientos que definen cada categoría de evaluación en función de los criterios de decisión escogidos) y facilitar la actualización o verificación de las definiciones de las categorías de evaluación de proveedores cuando sea requerido.

Para ello se clasifica a los proveedores en categorías predefinidas sobre las cuales se ha establecido un orden de preferencia, definido por el tomador de decisiones (por ejemplo: excelente, bueno, regular, malo). La evaluación de los proveedores se hace para garantizar que estos cumplen con los requerimientos mínimos de calidad de la empresa u organización (alineados con la visión estratégica de la empresa u organización). Se incluyen en la evaluación múltiples criterios, los más populares aparecen en la tabla 2.1.

Al emplear un método de evaluación multicriterio se pueden expresar de forma clara los perfiles de los proveedores que son deseables para el tomador de decisiones. Estos perfiles sirven no sólo a la empresa para expresar sus políticas y expectativas, sino a los propios proveedores para participar en el proceso de elección o prepararse para el mismo.

Durante esta fase se definen cuáles serán los criterios que se utilizarán para evaluar a los proveedores, las escalas de preferencia asociadas a cada criterio, se establecen las categorías y los perfiles que definen las categorías de evaluación (ver figura 2.4) y de esta manera de forma implícita se define el orden de preferencia sobre las categorías. Todo esto se lleva a cabo entre los analistas y él o los tomadores de decisiones.

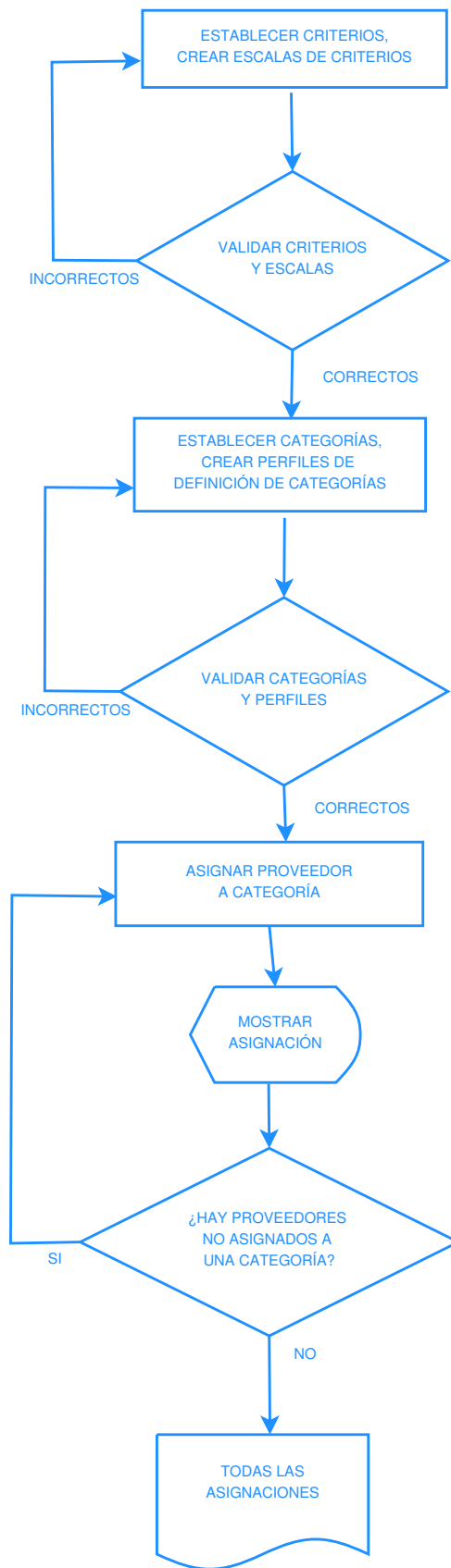


Figura 3.2: Fase 1 de la metodología

Los proveedores mejor evaluados son sometidos a un proceso de selección cuando se realiza el diseño y la planeación de la cadena de suministro (fase II de la metodología).

3.2.2 FASE II O FASE DE OPTIMIZACIÓN

En esta fase se busca obtener opciones de diseño y planeación de la cadena de suministro que resultan de un proceso de optimización en el cual se consideran todos los aspectos discutidos en la sección 3.1. Se plantea un problema de optimización con uno, dos o múltiples objetivos, se diseña un modelo matemático lineal entero mixto que representa el problema.

Contar con tal modelo sirve en etapas tempranas del estudio del problema para obtener soluciones exactas de instancias que son resueltas con facilidad en términos computacionales o para la generación de cotas que sirve para la implementación de algoritmos heurísticos, en el caso de instancias que resultan ser difíciles de resolver en términos computacionales. El modelo sirve como base para cualquier modificación del problema que se desee implementar, dicha modificación puede representarse en el modelo como función objetivo, variables de decisión o restricciones. Como entrada del problema de optimización que se resuelve en esta fase se tiene a aquellos proveedores que han obtenido evaluaciones satisfactorias en la primera fase de la metodología.

Durante esta fase se obtienen como soluciones del problema de optimización los diseños y planeaciones de la cadena que representan compromisos aceptables entre los objetivos, definidos por el o los tomadores de decisiones.

A continuación se describe el modelo matemático planteado

3.2.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Notación

Conjuntos

S	conjunto potencial de proveedores s
I	conjunto potencial de plantas i
J	conjunto potencial de bodegas j
K	conjunto de centros de distribución k
L	conjunto de tipos de medios de transporte ℓ
R	conjunto de materias primas r
F	conjunto de productos terminados f

Parámetros

Proveedores

CS_s^r	costo de compra de una unidad de materia prima r al proveedor s
CT_{sil}^r	costo de transportar la materia prima r del proveedor s a la planta i por el medio de transporte ℓ
TE_{sil}^r	tiempo de entrega de la materia prima r entre el proveedor s y la planta i usando el transporte ℓ
$MT1_{sil}^r$	capacidad del transporte tipo ℓ para la materia prima r del proveedor s a la planta i
gr_r	volumen ocupado por unidad de materia prima r en el medio de transporte

Plantas

CI_i	costo fijo por abrir la planta i
--------	------------------------------------

MPM_i^f	capacidad de manufactura de la planta i para el producto f
CMA_i^f	costo de manufacturar una unidad del producto f en la planta i
TMA_i^f	tiempo de manufactura de una unidad del producto f en la planta i
$CP_{ij\ell}^f$	costo de envío de una unidad del producto f de la planta i a la bodega j utilizando el tipo de transporte ℓ
$TP_{ij\ell}^f$	tiempo de transporte del producto f de la planta i a la bodega j utilizando el tipo de transporte ℓ
b^rf	cantidad de unidades de materia prima r requerida para producir una unidad del producto f
$MT2_{ij\ell}^f$	capacidad del transporte tipo ℓ para el producto f de la planta i a la bodega j

Bodegas

CF_j	costo fijo por abrir la bodega j
MW_j^f	capacidad de almacenamiento de la bodega j para el producto f
$CW_{jk\ell}^f$	costo de envío de una unidad del producto f de la bodega j al centro de distribución k utilizando el tipo de transporte ℓ
$TW_{jk\ell}^f$	tiempo de transporte del producto f de la bodega j al centro de distribución k utilizando el tipo de transporte ℓ
$MT3_{jk\ell}^f$	capacidad del transporte tipo ℓ para el producto f de la bodega j al centro de distribución k

gf_f volumen ocupado por el producto f en el medio de transporte

Centros de distribución

D_k^f demanda del centro de distribución k para el producto f

G Es una cota para activar el uso de proveedores y plantas seleccionadas

Variables de decisión

Proveedores

S_s variable binaria igual a uno si el proveedor s es seleccionado para enviar materia prima al menos a una planta y cero en otro caso

V_{sil}^r cantidad de unidades transportadas de la materia prima r por el tipo de transporte ℓ del proveedor s a la planta i

$TR1_{sil}^r$ variable binaria igual a uno si el transporte de tipo ℓ es seleccionado para transportar la materia prima r del proveedor s a la planta i y cero en otro caso

Plantas

P_i variable binaria igual a uno si la planta i se abre y cero en otro caso

U_i^f variable binaria igual a uno si en la planta i se manufactura el producto f y cero en otro caso

R_i^f cantidad de unidades manufacturadas en la planta i del producto f

$X_{ij\ell}^f$ unidades enviadas del producto f por el tipo de transporte ℓ de la planta i a la bodega j

$AT_{ij\ell}^f$ variable binaria igual a uno si se selecciona el tipo de medio de transporte ℓ para enviar el producto f entre la planta i y la bodega j y cero en otro caso

Bodegas

Z_j variable binaria igual a uno si la bodega j se abre y cero en otro caso

$Y_{jk\ell}^f$ unidades transportadas del producto f de la bodega j al centro de distribución k utilizando el tipo de transporte ℓ

$BT_{jk\ell}^f$ variable binaria igual a uno si se selecciona el tipo de transporte ℓ para enviar el producto f entre la bodega j y el centro de distribución k y cero en otro caso

Restricciones

PROVEEDORES - PLANTAS

1. Si el proveedor es seleccionado, entonces envía materia prima.

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{\ell \in L} V_{sil}^r \leq GS_s \quad \forall s \in S \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{\ell \in L} V_{sil}^r \geq S_s \quad \forall s \in S \quad (3.2)$$

2. Envío solo a plantas abiertas:

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{\ell \in L} V_{sil}^r \leq GP_i \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

3. Balance de plantas: Asegura que la materia prima r proveniente de los proveedores a la planta i es usada para la manufactura de los productos f que la

requieran.

$$\sum_{\ell \in L} \sum_{s \in S} V_{sil}^r \geq \sum_{f \in F} b^{rf} R_i^f \quad \forall r \in R, i \in I \quad (3.4)$$

4. Capacidad de manufactura de las plantas: cuida que la cantidad de producto f manufacturado en la planta i no exceda la capacidad de manufactura que presenta la planta i para el producto f .

$$R_i^f \leq MPM_i^f U_i^f \quad \forall i \in I, f \in F \quad (3.5)$$

5. Enviar solo lo que se manufactura: se asegura que la cantidad de producto f enviada de la planta i a las bodegas no exceda a la cantidad de producto f manufacturado en la planta i .

$$R_i^f \geq \sum_{j \in J} \sum_{\ell \in L} X_{ij\ell}^f \quad \forall i \in I, f \in F \quad (3.6)$$

6. Capacidad del transporte en el primer nivel: No exceder la capacidad parcial del medio de transporte

$$gr_r V_{sil}^r \leq MT1_{sil}^r TR1_{sil}^r \quad \forall s \in S, i \in I, \ell \in L, r \in R \quad (3.7)$$

PLANTAS - BODEGAS

7. Único medio de transporte: garantiza el uso de un único medio de transporte ℓ de la planta i a la bodega j para transportar el producto f .

$$\sum_{\ell \in L} AT_{ij\ell}^f \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, f \in F \quad (3.8)$$

8. Bodegas abiertas: asegura que la bodega j que está abierta recibe productos de al menos una planta i .

$$\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{\ell \in L} AT_{ij\ell}^f \geq Z_j \quad \forall j \in J \quad (3.9)$$

9. Balance de flujo en bodegas: se asegura que la cantidad de producto que llega a las bodegas es la misma cantidad de producto que sale hacia los centros de distribución.

$$\sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L} X_{ij\ell}^f = \sum_{k \in K} \sum_{\ell \in L} Y_{jkl}^f \quad \forall f \in F, j \in J \quad (3.10)$$

10. Capacidad de transporte en el segundo nivel: No exceder la capacidad de los transportes en el segundo nivel

$$gf_f X_{ij\ell}^f \leq MT 2_{ij\ell}^f AT_{ij\ell}^f \quad \forall i \in I, j \in J, \ell \in L, f \in F \quad (3.11)$$

BODEGAS - CENTROS DE DISTRIBUCIÓN

11. Capacidad de la bodega abierta: establece que el flujo que sale de las bodegas no exceda su capacidad y al mismo tiempo requiere que el flujo del producto se haga a través de las bodegas abiertas.

$$MW_j^f Z_j - \sum_{k \in K} \sum_{\ell \in LW_{jk}} Y_{jkl}^f \geq 0 \quad \forall j \in J, f \in F \quad (3.12)$$

12. Demanda: garantiza que el flujo del producto f de las bodegas j al centro de distribución k por los medios de transporte ℓ satisfagan la demanda del producto f en el centro de distribución k

$$\sum_{j \in J} \sum_{\ell \in LW_{jk}} Y_{jkl}^f \geq D_k^f \quad \forall k \in K, f \in F \quad (3.13)$$

13. Único medio de transporte: garantiza el uso de un único medio de transporte de la bodega j al centro de distribución k para transportar los productos f , es decir, si una bodega envía diferentes productos a un mismo CD, lo haga por un solo medio de transporte.

$$\sum_{\ell \in LW_{jk}} BT_{jkl}^f \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K, f \in F \quad (3.14)$$

14. Capacidad del transporte en el tercer nivel

$$gf_f^l Y_{jkl}^f \leq MT 3_{jkl}^f BT_{jkl}^f \quad \forall j \in J, k \in K, \ell \in L, f \in F \quad (3.15)$$

Objetivos

Cualquier combinación de los criterios presentados en la tabla 2.1 pueden ser tomados como objetivos de una realización concreta del problema sujeto a estudio por uno o varios tomadores de decisión. En particular, la combinación de objetivos minimizar costo total de operación y minimizar el máximo tiempo de operación de la cadena (manufactura y distribución) es de interés ya que estos dos objetivos se relacionan con cinco de los seis resultados básicos de la gestión de cadenas de suministro orientada a resultados (misma que se describe en la sección 2.7).

A continuación se formulan estos dos objetivos:

1. minimizar el costo total de operar la cadena;
2. minimizar el tiempo máximo de operación desde los proveedores hasta los centros de distribución.

El costo de operar la cadena incluye: costo fijo de abrir plantas y bodegas, costo de compra de materia prima al proveedor, costo de manufactura y costo de transporte en los tres niveles de la cadena.

Matemáticamente la función del costo se expresa como:

$$\begin{aligned}
 Min \quad f_1 = & \sum_{i \in I} CI_i P_i + \sum_{j \in J} CF_j Z_j + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} CS_s^r \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L} V_{sil}^r \\
 & + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L_{si}} \sum_{r \in R} CT_{sil}^r V_{sil}^r + \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} CMA_i^f R_i^f + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\ell \in L} \sum_{f \in F} CP_{ij\ell}^f X_{ij\ell}^f + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{\ell \in L} \sum_{f \in F} CW_{jkl}^f Y_{jkl}^f \quad (\text{Ob.1})
 \end{aligned}$$

donde

$$\sum_{i \in I} CI_i P_i$$

costo fijo total de abrir las plantas

$$\sum_{j \in J} CF_j Z_j$$

costo fijo total de abrir las bodegas

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} CS_s^r \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L} V_{sil}^r$$

costo total de compra de materias primas

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{\ell \in L} \sum_{r \in R} CT_{sil}^r V_{sil}^r$$

costo total de transportar las materias primas a las plantas

$$\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} CMA_i^f R_i^f$$

costo total de manufacturar los productos en las plantas

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\ell \in L} \sum_{f \in F} CP_{ij\ell}^f X_{ij\ell}^f$$

costo total de transportar los productos de las plantas a las bodegas

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{\ell \in L} \sum_{f \in F} CW_{jkl}^f Y_{jkl}^f$$

costo total de transportar los productos de las bodegas a los centros de distribución

El segundo objetivo consiste en minimizar el tiempo máximo a lo largo de la cadena. Para ello vamos a medir los tiempos máximos desde la salida de la materia prima de los proveedores hasta la llegada de los productos terminados a cada uno de los centros de distribución, pasando por las plantas y las bodegas.

Matemáticamente el objetivo del tiempo se expresa como:

$$\begin{aligned} \min \quad f_2 = \max_i \left[\max_s (TE_{sil}^r S_s) + \max_f (TMA_i^f R_i^f) + \right. \\ \left. \max_j \left[\max_\ell (TP_{ij\ell}^f AT_{ij\ell}^f) + \max_{k,\ell} (TW_{jk\ell}^f BT_{jk\ell}^f) \right] \right] \quad (\mathbf{Ob.2}) \end{aligned}$$

donde

$\max_s (TE_{si} S_s)$ Tiempo de entrega máximo entre los proveedores y la planta i

$\max_f (TMA_i^f R_i^f)$ Tiempo máximo de manufacturar en la planta i

$\max_\ell (TP_{ij\ell} AT_{ij\ell})$ Tiempo máximo de entrega de la planta i a la bodega j

$\max_{k,\ell} (TW_{jk\ell} BT_{jk\ell})$ Tiempo máximo de entrega entre bodegas y centros de distribución

Obsérvese que la función objetivo del tiempo (**Ob.2**) no es una función lineal. Con el propósito de linealizarla se introducen las siguientes variables auxiliares.

VARIABLES AUXILIARES

- T variable auxiliar igual al tiempo máximo de envío desde los proveedores hasta los centros de distribución
- H_1^i variable auxiliar igual al tiempo máximo en el primer nivel de la cadena de suministro, es decir, $H_1^i = \max(T E_{sil}^r S_s)$
- H_2^i variable auxiliar igual al tiempo máximo de manufactura en las plantas, es decir, $H_2^i = \max(T M A_i^f R_i^f)$
- H_3^{ij} variable auxiliar igual al tiempo máximo en el segundo nivel de la cadena de suministro, es decir, $H_3^{ij} = \max(T P_{ij\ell}^f A T_{ij\ell}^f)$
- H_4^j variable auxiliar igual al tiempo máximo en el tercer nivel de la cadena de suministro, es decir, $H_4^j = \max(T W_{jkl}^f B T_{jkl}^f)$
- H_5^i variable auxiliar igual al tiempo máximo en el segundo y tercer nivel de la cadena de suministro, es decir, $H_5^i = \max(T P_{ijl}^f A T_{ijl}^f + T W_{jkl}^f B T_{jkl}^f)$

De esta manera la función del tiempo se redefine como minimizar T sujeta a las restricciones:

$$T - H_1^i - H_2^i - H_3^{ij} - H_4^j - H_5^i \geq 0 \quad \forall \quad i \in I, j \in J \quad (1)$$

$$H_1^i - T E_{sil}^r S_s \geq 0 \quad \forall \quad s \in S, i \in I, r \in R, l \in \ell \quad (2)$$

$$H_2^i - T M A_i^f R_i^f \geq 0 \quad \forall \quad f \in F \quad (3)$$

$$H_3^{ij} - T P_{ij\ell}^f A T_{ij\ell}^f \geq 0 \quad \forall \quad i \in I, j \in J, f \in F, l \in L \quad (4)$$

$$H_4^j - T W_{jkl}^f B T_{jkl}^f \geq 0 \quad \forall \quad j \in J, k \in K, l \in L, f \in F \quad (5)$$

$$H_5^i - (H_3^{ij} + H_4^j) \geq 0 \quad \forall \quad i \in I, j \in J \quad (6)$$

La linealización de la función objetivo de tiempo se hace con el propósito de

validar el modelo usando métodos lineales. De aquí en adelante al modelo formado por las restricciones (3.1) - (3.15), junto con las restricciones de linealización (1),(2),(3),(4),(5),(6) y las funciones objetivo **Ob.1** y **Ob.2** lo denotaremos como modelo **mod-BiObj**.

Dado que el enfoque que estamos manejando para la cadena de suministro es desde una perspectiva dirigida a resultados (*en ingles: outcome-driven*), los objetivos de costo y tiempo se relacionan como se muestra en la figura 3.3.

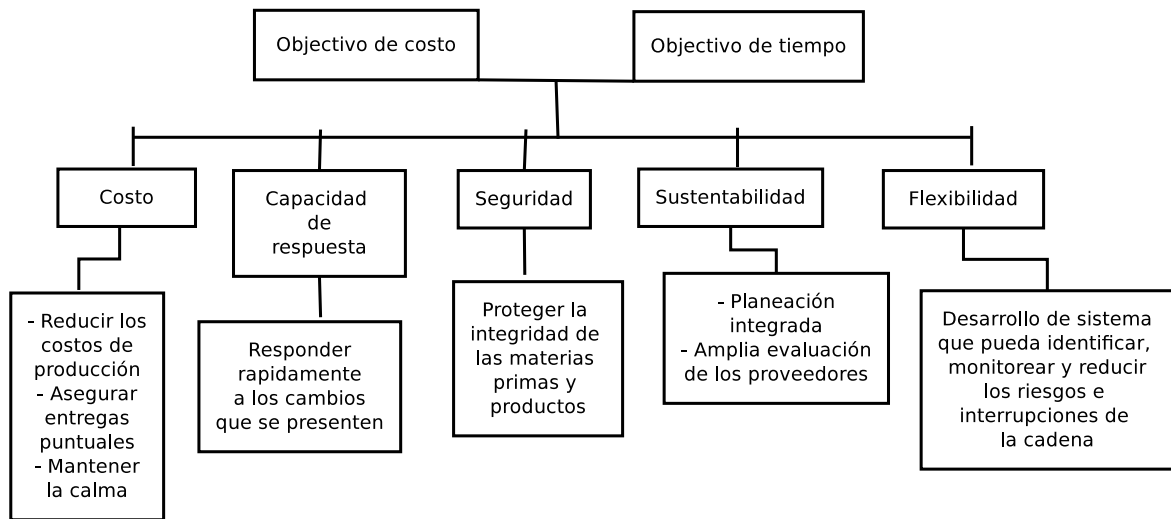


Figura 3.3: Relación de los objetivos con la perspectiva orientada a resultados

3.2.3 FASE III O FASE DE SELECCIÓN

Típicamente las metodologías desarrolladas para resolver problemas de optimización multiobjetivo terminan cuando se ha obtenido un frente satisfactorio (para el tomador de decisiones) que contiene imágenes de soluciones eficientes, en el sentido de Pareto o según una definición alternativa de eficiencia.

Sin embargo, al presentarle al tomador de decisiones el conjunto de soluciones eficientes encontradas se origina otro problema de decisión, ya que entre estas soluciones el tomador de decisiones debe decidir cuáles son las que representan compromisos

aceptables entre los múltiples criterios u objetivos que han sido considerados en su problema de decisión; al final el tomador de decisiones escogerá una o un conjunto muy reducido de soluciones eficientes (*región de interés, ROI*), convirtiéndose en un problema de selección multicriterio.

La búsqueda de la *ROI* no es un proceso simple ya que implica la modelación de preferencias del tomador de decisiones, la comparación entre alternativas cuando se tienen más de tres criterios (ya que para el caso de dos o tres criterios puede hacerse de forma visual analizando el frente no dominado).

El propósito de esta fase consiste en apoyar al tomador de decisiones en la búsqueda de la *ROI*. Para encontrar la *ROI* se pueden aplicar métodos de búsqueda que incorporan preferencias a priori, durante o posterior al proceso de optimización. En la programación matemática han resultado populares los métodos de incorporación de metas, estos métodos incorporan preferencias a priori (Romero, 1993) o durante el proceso (métodos de incorporación de metas entre otros). Para problemas multiobjetivo bajo certeza, existen métodos basados en la metodología PROMETHEE, entre otros, que incorporan preferencias a posteriori para encontrar la *ROI*. Recientemente, se han desarrollado métodos metaheurísticos que incorporan preferencias a priori entre estos, un método interesante es *NOSGAI* (Fernandez et al., 2011) por el enfoque que sigue de reducción de objetivos.

En la metodología desarrollada se recomienda usar *NOSGAI* para encontrar la *ROI* a partir de un frente no dominado, pero cualquier otro método puede ser usado para la búsqueda de esta.

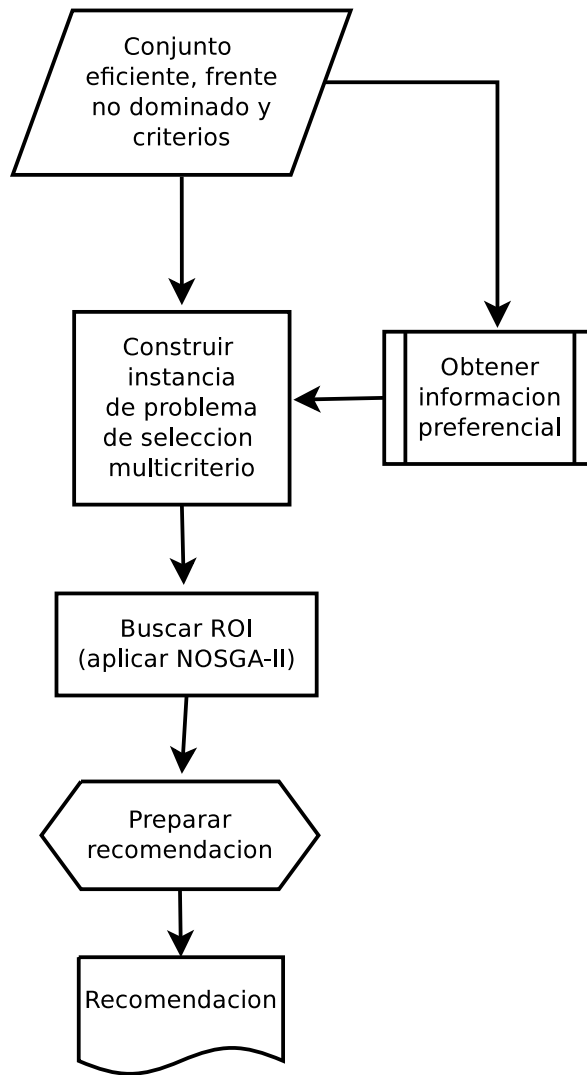


Figura 3.4: Fase III de la metodología propuesta

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de este capítulo es presentar la experimentación realizada para ilustrar la aplicabilidad de la metodología.

4.1 EXPERIMENTACIÓN FASE I: EVALUACIÓN DE LOS PROVEEDORES

Muchos métodos de ayuda a la decisión multicriterio se han desarrollado para los problemas de evaluación multicriterio (Fernandez et al., 2008). Por lo general, un método de evaluación multicriterio intenta capturar la política del decisor que está implícita en el conjunto de referencia de ejemplos previamente evaluado por algún tomador de decisiones. Después, el modelo utiliza esa política para clasificar los objetos nuevos. En el marco de las relaciones de sobreclasificación uno de los métodos más utilizados es ELECTRE-TRI (Almeida-Dias et al., 2010).

Como ya se mencionó en la sección 2.4, este método asigna alternativas evaluadas para n criterios a categorías ordenadas preferencialmente y predefinidas. En nuestro caso, las diferentes alternativas serán los proveedores s_i . Se definen dos categorías: proveedores pre-seleccionados C_1 , proveedores no pre-seleccionados C_2 , donde la categoría C_1 es preferida a la categoría C_2 ; para esta experimentación se consideraron los siguientes criterios, que fueron seleccionados entre los más frecuentes en la literatura revisada: tiempo de entrega, costo, calidad, capacidad de manufactura.

Para fines prácticos, se muestra un ejemplo sencillo en el que se aplica ELECTRE-TRI para realizar la pre-selección de proveedores. Se asume que los valores de los parámetros que representan las preferencias de un tomador de decisiones han sido suministrados por un tomador de decisiones en un proceso de licitación de preferencias.

Ejemplo:

Se consideran seis proveedores (s_1, s_2, \dots, s_6) , evaluados bajo cuatro criterios, (tiempo de entrega c_1 , costo c_2 , calidad c_3 y capacidad de manufactura c_4). En criterios c_1 y c_2 las preferencias son decrecientes mientras que en criterios c_3 y c_4 las preferencias son crecientes. La matriz de desempeño es dada en la tabla 4.1

Alternativas	tiempo	costo	calidad	manufactura
s_1	60	40	5	7
s_2	60	40	3	3
s_3	70	80	3	7
s_4	50	30	5	7
s_5	90	130	9	3
s_6	80	180	3	1

Tabla 4.1: Matriz de desempeño

Se define el perfil $b = \{60, 80, 5, 7\}$ usando la información de de las tablas 4.1 y 4.2 . La categoría C_1 se define a partir del perfil como aquellas alternativas que sobreclasifican al perfil b , mientras que la categoría C_2 se define por las alternativas que no sobreclasifican al perfil b .

	c_1	c_2	c_3	c_4
$p_j(b)$	1.5	1.5	1.5	1.5
$q_j(b)$	1	1	1	1
k_j	0.25	0.25	0.25	0.25

Tabla 4.2: Parámetros de preferencia de los criterios (j): k_j importancia relativa, q_j umbral de preferencia débil, p_j umbral de preferencia estricta

COMPARACIÓN DE s_1 Y b :

1. calculando índice parcial de concordancia $c_j(b, s_1)$ (ver tabla 4.3):

	c_1	c_2	c_3	c_4
$c_j(s_1, b)$	1	0	1	1
$c_j(b, s_1)$	1	1	1	1

Tabla 4.3: Índice parcial de concordancia

2. calculando índice de concordancia $c(b, s_1)$ y $c(s_1, b)$:

$$c(s_1, b) = \frac{1}{4}(1 + 0 + 1 + 1) = 0.75$$

$$c(b, s_1) = \frac{1}{4}(1 + 1 + 1 + 1) = 1$$

3. No se considera discordancia, entonces $d_j(s_i, b)$ y $d_j(b, s_i)$ son iguales a cero. Los índices de credibilidad $\sigma(s_i, b)$ y $\sigma(b, s_i)$ son iguales a los índices de concordancia, los cuales se muestran en la tabla 4.4:

alternativa	$\sigma(b, s_i)$	$\sigma(s_i, b)$
s_1	1	0.75
s_2	0.50	0.75
s_3	0.50	1
s_4	1	0.50
s_5	0.25	0.75
s_6	0	1

Tabla 4.4: índices de credibilidad

4. determinación de la relación de preferencia entre s_i y b (tabla 4.5):

alternativa	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.75$	$\lambda = 1$
s_1	I	I	\succ
s_2	I	\prec	R
s_3	I	\prec	\prec
s_4	I	\succ	\succ
s_5	\prec	\prec	R
s_6	\prec	\prec	\prec

Tabla 4.5: comparación de perfiles

Como se puede ver en la tabla 4.5 los proveedores s_1 y s_4 deben ser seleccionados por el tomador de decisiones, independientemente de los niveles de λ . Entre los proveedores s_2 y s_3 si hubiese que seleccionar obligatoriamente a uno de los dos, entonces se debería seleccionar a s_2 , ya que para $\lambda = 1$ este proveedor no es sobre-calificado por el perfil, mientras que para los otros valores de $\lambda = 0.5$ y $\lambda = 0.75$ presenta los mismos valores que el perfil. Si se considera que el valor de $\lambda = 1$ es no realista, entonces los proveedores s_2 y s_3 tienen un desempeño similar, si uno es pre-seleccionado o no, entonces el otro también debe ser pre-seleccionado o no. El tomador de decisiones podría retrasar la decisión y hacer un poco más investigación y obtener más información acerca de estos proveedores.

Por otro lado los proveedores s_5 y s_6 son sin lugar a dudas sobreclasificados por

el perfil, entonces no deben ser seleccionados por el tomador de decisiones, debido a que no cumplen los requisitos que la organización expresa en el perfil. El proceso de preselección también ayuda a los proveedores a identificar sus debilidades frente a los requisitos de la organización y fortalecerlas y poder ser pre-seleccionados en un futuro por el tomador de decisiones.

	optimista	pessimista
categoría	$\lambda = 0.5$	
pre-seleccionado	s_1, s_2, s_3, s_4	s_1, s_2, s_3, s_4
no pre-seleccionado	s_5, s_6	s_5, s_6
	$\lambda = 0.75$	
pre-seleccionado	s_1, s_4	s_1, s_4
no pre-seleccionado	s_2, s_3, s_5, s_6	s_2, s_3, s_5, s_6
	$\lambda = 1$	
pre-seleccionado	s_1, s_2, s_4, s_5	s_1, s_4
no pre-seleccionado	s_3, s_6	s_2, s_3, s_5, s_6

Tabla 4.6: Resultados de la selección de proveedores para diferentes niveles de λ

Hemos mostrado, mediante un ejemplo, el cual fue tomado y modificado de (Wu, 2009), cómo un problema de evaluación multicriterio para la pre-selección de proveedores se formula y resuelve empleando el método ELECTRE TRI.

Una vez que se ha evaluado a los proveedores y éstos han sido clasificados en las dos categorías previamente definidas (proveedores pre-seleccionados C_1 y proveedores no pre-seleccionados C_2), se toman aquellos proveedores pre-seleccionados (asignados a la categoría C_1) para ingresarlos a la fase II de la metodología.

4.2 EXPERIMENTACIÓN FASE II: OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA

En la fase II de la metodología se generan los diseños y planeaciones de la cadenas de suministro que cumplan con las restricciones del problema y que son eficientes en el sentido de Pareto respecto a las medidas de desempeño seleccionadas.

Se tomaron instancias de problemas que comparten algunas características estructurales con el problema aquí estudiado con el propósito de establecer la flexibilidad del modelo y la eficiencia de la solución de estas instancias con métodos exactos.

También se presenta la construcción del generador de instancias utilizado para la experimentación y alcance del modelo, así como la descripción y resultados del diseño de experimento realizado para identificar los parámetros que hacen complicada la solución del problema.

4.2.1 COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE LA LITERATURA PARA PROBLEMAS RELACIONADOS

PRIMER PROBLEMA RELACIONADO

El trabajo que presenta Olivares-Benitez et al. (2006, 2012, 2013) se basa en una cadena de suministro de dos niveles, compuesta por plantas, bodegas y centros de distribución. Los niveles son conectados a través de medios de transporte, por los cuales se envía producto. Cada medio de transporte se caracteriza por los parámetros correlacionados negativamente de costo y tiempo. Las decisiones a determinar son de localización de bodegas, la selección de medios de transporte y la cantidad de flujo a enviar a lo largo de la cadena. Las medidas de desempeño que se optimizan en la cadena son minimizar el costo y tiempo de operación.

La estructura de las instancias utilizadas en la experimentación se presenta en la tabla 4.7, donde se agrupan por tamaño en chicas, medianas y grandes. Para establecer la relación inversa entre el costo y el tiempo Olivares utiliza una fórmula hiperbólica del tipo $costo = \frac{50}{tiempo}$ y el tiempo se generó empleando una distribución uniforme en el intervalo $[5, 25]$.

	Grupo	Plantas	CD	Clientes	Transportes
chicas	G1	5	5	5	2
	G2	5	5	5	5
	G3	5	5	20	2
medianas	G4	5	20	20	2
	G5	20	20	20	2
	G6	20	20	20	5
grandes	G7	20	20	50	5
	G8	50	50	50	2
	G9	50	50	100	2

Tabla 4.7: Tamaño de las instancias de Olivares-Benitez et al. (2006)

Se hicieron las siguientes modificaciones en el modelo para adaptarlo al problema de Olivares:

- Se eliminaron índices, parámetros, variables y restricciones que están relacionados con el primer nivel de la cadena, que relaciona a proveedores con plantas y la manufactura en plantas.
- Se eliminan los términos correspondientes al primer nivel y a la manufactura en plantas en los objetivos costo y tiempo.
- Se hacen las adecuaciones necesarias en los niveles dos y tres para considerar un solo producto.
- Se resuelve el problema de ubicación sólo para bodegas.
- No se consideran capacidades parciales en los medios de transporte.

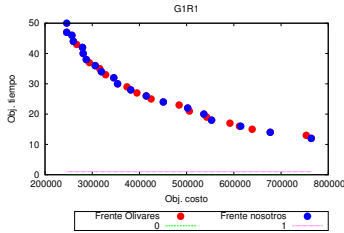


Figura 4.1: chica

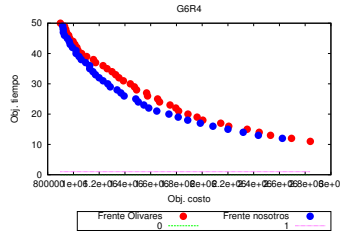


Figura 4.2: mediana

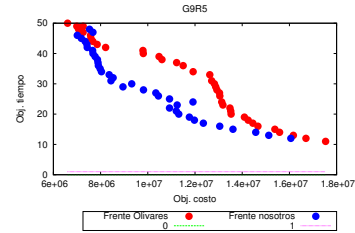


Figura 4.3: grande

- Se activa la restricción de asignación única entre bodegas y centro de distribución.

En Olivares (2007) se reportan resultados con la aplicación de un método exacto para las instancias chicas, mientras que en Olivares-Benitez et al. (2012) se implementan variantes del método ϵ -restricción que se aplican para resolver instancias chicas y medianas y en Olivares (2007); Olivares-Benitez et al. (2013) se presentan métodos heurísticos para resolver las instancias grandes. En nuestro caso todas las instancias mencionadas en la tabla 4.7 pudieron ser resueltas con un método exacto. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los frentes generados por Olivares y los frentes generados por nosotros en una instancia chica, mediana y grande. Las figuras que contienen los frentes de las restantes instancias pueden consultarse en el apéndice A.

Como se observa en estas figuras los resultados arrojados por nuestra implementación no resultan inferiores a aquellos presentados por Olivares. Es importante mencionar que en nuestro caso se ha usado el método Augmecon2 para resolver todas las instancias. Para realizar una comparación cuantitativa de los frentes obtenidos se han empleado dos medidas de desempeño:

1. Medida de hipervolumen S
2. Medida de cobertura entre dos conjuntos, $C(A, B)$, también denotada como la métrica C

Para detalles de cada métrica consultar el apartado 2.6

En la tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos con la métrica del hipervolumen y en la tabla 4.9 se muestran los resultados de la métrica de cobertura.

Instancia	Olivares	nuestros
G1	9284295.2	9284295.108
G2	22498404.8	22434851.069
G3	31993625.1	31993625.1
G4	45143832	47628272.133
G5	58896962.9	61680586.836
G6	66231324.5	70439364.294
G7	262922926.8	279413563.116
G8	301492153.1	315394294.137
G9	210275877.5	309241471.41

Tabla 4.8: Resultados con la métrica de hipervolumen

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
d_{AB}	0.542	0.552	0.379	0.837	0	0	0.675	0.200	0.230
d_{BA}	0.342	0.394	0.827	0.729	0.487	0.300	0.375	0.475	0.743

Tabla 4.9: Porcentaje obtenido con la métrica de cobertura

donde d_{AB} indica el porcentaje de puntos del frente de Olivares que domina al porcentaje de puntos del frente de nosotros y d_{BA} indica el porcentaje de puntos del frente de nosotros que domina al porcentaje de puntos del frente de Olivares

Los resultados de las métricas mostrados en las tablas 4.8 y 4.9 se puede observar que en la mayoría de las instancias los frentes obtenidos por Augmecon2 son superiores a los obtenidos por Olivares (2007); Olivares-Benitez et al. (2013) y en las instancias grandes nuestros resultados son claramente superiores.

Otras instancias encontradas en la literatura son las que se presentan en el trabajo de Cordeau et al. (2006). El problema que resuelven es un problema similar al que se aborda en esta investigación, aunque cabe destacar que existen algunas diferencias entre ambos. A continuación se describen estas diferencias.

SEGUNDO PROBLEMA RELACIONADO

El trabajo presentado en Cordeau et al. (2006) se aborda desde una versión monobjetivo considerando solo minimizar el costo de operar la cadena; la selección de los proveedores se hace sólo tomando en cuenta el criterio de costo. Las capacidades de los medios de transporte son consideradas en dependencia de la demanda, en nuestro caso consideramos que cada medio de transporte tiene capacidades parciales por cada producto. En ambos trabajos se considera que la demanda de cada centro de distribución es conocida. Estos autores resuelven el problema usando ramificación y acotamiento y una descomposición de Bender.

El tamaño de las instancias con las que trabajan estos autores puede apreciarse en la tabla 4.10. Para poder validar nuestro modelo con estas instancias, tuvimos que hacer algunas adaptaciones a nuestro problema con las características que se presentan en Cordeau et al. (2006). Las adaptaciones que se hicieron a nuestro problema fueron: se consideró el problema en la versión monoobjetivo, se eliminaron los parámetros de tiempos de transporte y tiempos de manufactura, se eliminó la capacidad parcial de los medios de transporte, se consideró la selección de proveedores sólo por el criterio de costo. Para fines experimentales agrupamos las instancias en chicas, medianas y grandes.

Grupo	S	I	J	K	L	R	F
chicas	10	10	10	100	3	20	20
medianas	20	20	20	200	3	40	40
grandes	30	30	30	300	3	60	60

Tabla 4.10: Tamaño de las instancias de Cordeau

Como se mencionó anteriormente, el trabajo de Cordeau es monobjetivo a continuación se describen los resultados obtenidos.

Para evaluar el rendimiento del modelo con las instancias de Cordeau se implementó un programa en lenguaje C++ enlazado con Concert-CPLEX 12.4 y se resolvió usando un procesador Intel-Core i7-3537U CPU 2.00GHz4 con 8 GB de

RAM.

Primero se consideró la optimización del objetivo costo, con las modificaciones anteriormente mencionadas al modelo presentado en la sección 3.2.2. Lo interesante de la solución a las instancias de Cordeau radica en que en todos los casos se obtuvieron los óptimos exactos (con gaps inferiores al 0.5 %), mientras que los resultados reportados en Cordeau et al. (2006, 2008) se obtuvieron con gaps mayores al 10 %, aún aplicado descomposición de Benders y procedimientos heurísticos. La importancia de estos resultados radica en que otros trabajos más recientes que citan a Cordeau siguen empleando procedimientos heurísticos. Los resultados obtenidos sirvieron también para validar el modelo ya que se obtuvieron exactamente los mismos resultados reportados por Cordeau.

Posteriormente se optimizó el objetivo tiempo con las instancias de Cordeau, para ello se aplicaron las modificaciones descritas anteriormente y se generaron los tiempos aleatoriamente empleando la relación de costo descrita en Olivares (2007); Olivares-Benitez et al. (2013). También se obtuvieron las soluciones óptimas en todas las instancias, aunque, como se puede observar en la comparación de los tiempos de cómputo en ambos experimentos en las tablas 4.11 y 4.12, los tiempos de cómputo para la optimización del costo son menores a los obtenidos en la optimización del tiempo.

Estos resultados evidencian que el tiempo resulta un objetivo más complejo que el costo (algo que puede deducirse por la propia estructura del objetivo pero que se confirma experimentalmente con estos dos experimentos)

En la tabla 4.11 en la primera columna se observa el nombre de la instancia, en la segunda columna se presenta el valor del objetivo de costo, en la tercera columna se tiene el valor del tiempo máximo de traslado en la cadena para la solución con el valor mínimo del costo (solución óptima para el objetivo del costo) y en la cuarta columna se presenta el tiempo CPU para obtener la minimización de costo. La tabla 4.12 tiene características similares, en la primera columna se presenta el nombre de

Ins.	min costo	valor del tiempo	tiempo CPU sec.
100ca1	17 184 191.63	234 216	0.2687
100ca2	25 064 316.93	247 086	0.3104
100ca3	7 547 662.52	241 639	0.5017
100ca4	8 497 496.38	253 795	0.5915
200ca1	110 915 998.67	298 628	3.1348
200ca2	264 502 883.48	283 531	8.7085
200ca3	59 525 859.28	319 412	5.9746
200ca4	82 476 195.57	343 972	4.4341
300ca1	375 717 871.06	296 370	11.7517
300ca2	699 481 221.26	340 307	17.3976
300ca3	179 975 222.59	373 732	33.0124
300ca4	344 851 809.88	375 433	65.3630

Tabla 4.11: Minimizando costo

la instancia, en la segunda columna el valor del costo en la solución con el mínimo tiempo de traslado en la cadena, o sea, en la solución óptima para el objetivo de tiempo, en la tercera columna se presenta el mínimo de tiempo y en la cuarta columna el tiempo CPU que tomo minimizar el objetivo de tiempo.

Comparando la columna 4 de cada tabla, se puede apreciar que el tiempo máquina es mayor para la minimización de tiempo que para la minimización de costo. Esto sucedió en todas las instancias experimentadas, debido a que al linealizar el tiempo se generan muchas restricciones que se activan cuando el tiempo es optimizado, lo que computacionalmente lo hace más pesado, lo que no ocurre cuando el objetivo de costo se optimiza.

El siguiente experimento que se realizó con las instancias de Cordeau consistió en realizar una optimización bi-objetivo al optimizar simultáneamente ambos objetivos, se busca identificar si efectivamente resulta más complejo resolver este problema que los dos problemas de optimización mono-objetivo generados al optimizar cada objetivo por separado.

Ins	valor del costo	min tiempo	tiempo CPU sec.
100ca1	80 719 272.1900	92 131.80	2.1463
100ca2	130 495 226.0400	104 459.10	2.8599
100ca3	52 842 407.5400	80 572.70	79.5209
100ca4	248 207 898.4700	94 512.80	5.3019
200ca1	382 550 065.1800	93 530.2000	48.6851
200ca2	854 635 421.93	87 201.5000	36.3869
200ca3	505 882 802.67	95 675.800	46.1179
200ca4	740 925 769.99	103 096.2000	46.2315
300ca1	647 420 712.44	91 777.20	130.1543
300ca2	2 160 201 829.19	90 648.60	189.9579
300ca3	579 406 332.73	81 281.60	489.7578
300ca4	2 138 155 558.050	75 126.00	778.0835

Tabla 4.12: Minimizando tiempo

Para trabajar con el modelo biobjetivo se implementó el método Augmecon2 en lenguaje *C++* enlazado con Concert-CPLEX. Se decidió tomar la función objetivo de tiempo como restricción, y el costo como objetivo ya que por lo general el costo aparece más importante en la literatura revisada.

Como ya se mencionó anteriormente las instancias tomadas de la literatura (Cordeau et al., 2006) se adaptaron, agregando parámetros de tiempo (tiempo de transporte en los tres niveles y tiempo de manufacturar los productos en las plantas), se utilizó la relación hiperbólica propuesta en (Olivares, 2007) para obtener los valores de tiempo en función del costo. Los tiempos computacionales que se obtuvieron al ejecutar el modelo **mod-BiObj** con las instancias de Cordeau se muestran en la tabla 4.13, donde se observa que se obtienen tiempos computacionales razonables, incluso para las instancias grandes.

Instancia	Tiempo CPU seg.	Instancia	Tiempo CPU seg.	Instancia	Tiempo CPU seg.
100cd1	16.63	200cd1	163.17	300cd1	318.36
100cD2	40.08	200cD2	234.85	300cD2	588.91
100Cd3	128.91	200Cd3	181.88	300Cd3	1070.67
100CD4	90.29	200CD4	423.59	300CD4	1657.68

Tabla 4.13: Tiempo de CPU en el problema bi-objetivo

Una vez que se ha mostrado que el modelo funciona correctamente con instancias de la literatura tanto en la versión monobjetivo como biobjetivo, se generaron instancias aleatorias en base a un diseño de experimentos con el que se busca identificar parámetros que influyen substancialmente en la complejidad de las instancias y el alcance del método exacto para solucionar instancias con diferentes configuraciones y tamaños.

4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE INSTANCIAS

El tamaño de la instancia es determinado por siete parámetros: número de potenciales proveedores $|\mathcal{S}|$, número de plantas $|\mathcal{I}|$, número de bodegas potenciales $|\mathcal{J}|$, número de centros de distribución $|\mathcal{K}|$, número de medios de transporte $|\mathcal{L}|$, número de materias primas $|\mathcal{R}|$ y por último número de productos manejados en la cadena $|\mathcal{F}|$.

La notación para representar una instancia es $\mathcal{S} - \mathcal{I} - \mathcal{J} - \mathcal{K} - \mathcal{L} - \mathcal{R} - \mathcal{F}$, por ejemplo $3 - 2 - 2 - 3 - 2 - 3 - 3$ indica que es una instancia formada por tres proveedores, dos plantas, dos bodegas, tres centros de distribución, dos medios de transporte, tres materias primas y tres productos.

Para cada combinación de proveedores, plantas, bodegas, centros de distribución, medios de transporte, materias prima y productos los parámetros restantes son generados de manera aleatoria.

A continuación se explica a detalle la generación de cada uno de estos parámetros (se tomo como referencia distribuciones empleadas en las instancias encontradas en la literatura, por ejemplo en los trabajos de Cordeau et al. (2006), y (Olivares, 2007)).

- **Costos de compra de las materias primas:** Este parámetro se generó con una distribución uniforme $U[1,100]$
- **Tiempo de entrega entre proveedores y plantas:** se utilizó una distribución uniforme $[1,100]$
- **El volumen ocupado por unidad de las materias primas y productos en los medios de transporte:** este parámetro fue generado como una uniforme $[1,10]$.
- **Demanda de los centros de distribución:** la demanda fue generada con una distribución uniforme entre $[1,100]$
- **Cantidad de materia prima requerida para los productos:** Este parámetro se generó con una distribución uniforme entre $[0,10]$
- **Capacidades parciales de los medios de transporte:** La capacidad parcial de los medios de transporte en el primer nivel se generó en dependencia de la cantidad de volumen que ocupa la materia prima y la cantidad requerida por cada producto para la manufactura de estos. La capacidad parcial de los medios de transporte en el segundo nivel se calculó tomando en cuenta el volumen que ocupa cada producto y la demanda de los centros de distribución
- **Capacidad de manufactura de las plantas:** Para garantizar que las plantas siempre tienen la capacidad necesaria para manufacturar el total de la demanda de los centros de distribución, este parámetro es calculado en dependencia de la demanda de los centros

- **Costo fijo por abrir las plantas:** El costo fijo por abrir las plantas está en dependencia de la capacidad que presenta cada planta, y se calcula como el logaritmo de la capacidad de la planta
- **Tiempo de manufactura por pieza de los productos:** se calcula en una distribución uniforme entre $[1,100]$
- **Capacidad de las bodegas:** es calculada tomando en cuenta la demanda por producto de los centros de distribución
- **Costo fijo por abrir las bodegas:** es calculado de la misma manera que el costo fijo por abrir las plantas, logaritmo de la capacidad de la bodega.

Los costos y tiempos de entrega de las materias primas y productos son calculados de tres diferentes maneras. Para establecer la relación entre costo y tiempo de distribución en los flujos de cada uno de los tres niveles se implementaron tres relaciones:

- Una relación hiperbólica, como la usada en Olivares (2007), se empleó la fórmula $Costo = \frac{600}{Tiempo}$;
- Una relación lineal, como la usada en Cordeau et al. (2006), para la que se empleó la fórmula $Costo = 100 - Tiempo + 1$.
- Una relación logarítmica, con la fórmula $Costo = 50 \cdot \log(100 - Tiempo + 1)$.

En la figura 4.4 se muestra la relación entre costo y tiempo en cada uno de estos generadores. Se emplearon diferentes relaciones para establecer si estas influyen de manera significativa en la complejidad de la instancia.

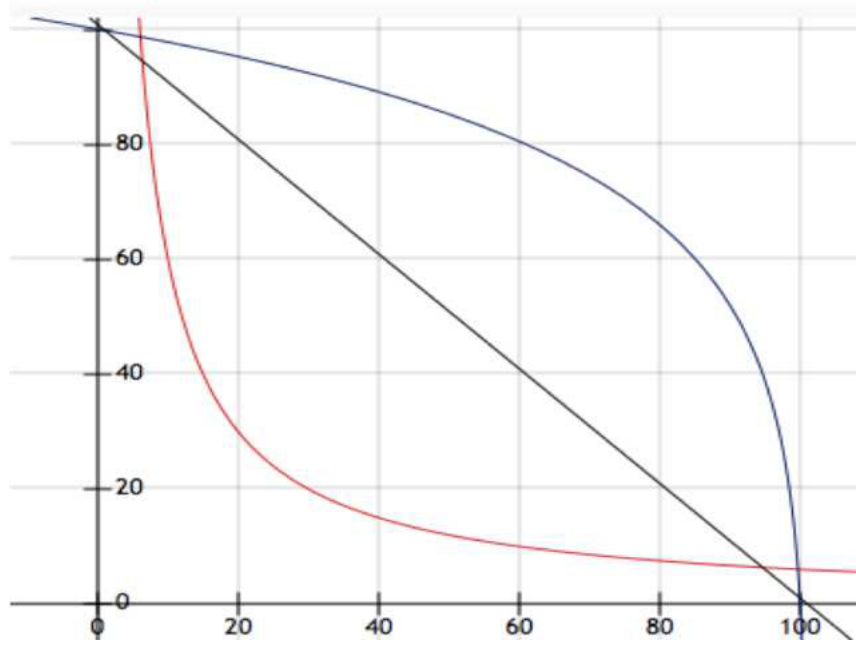


Figura 4.4: Relación de costo vs tiempo con los diferentes generadores

Grupo de instancias generadas para la experimentación

El diseño de experimento que se aplicará en este trabajo será sobre 16 grupos de instancias cuyos tamaños se muestran en la tabla 4.14. Para cada uno de los grupos se generaron tres réplicas, denotadas como R_1, R_2, R_3 , con cada una de las tres estructuras de los generadores antes descritos.

Grupo	S-P-B	CD	L	R-F	Grupo	S-P-B	CD	L	R-F
G1	5	10	1	5	G2	5	10	1	10
G3	5	10	3	5	G4	5	10	3	10
G5	5	20	1	5	G6	5	20	1	10
G7	5	20	3	5	G8	5	20	3	10
G9	20	10	1	5	G10	20	10	1	10
G11	20	10	3	5	G12	20	10	3	10
G13	20	20	1	5	G14	20	20	1	10
G15	20	10	3	5	G16	20	10	3	10

Tabla 4.14: Tamaño de instancias generadas

4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTO

Para verificar la influencia de los parámetros en la complejidad estructural de la instancia, se realizó un diseño factorial de 2^4 . En la tabla 4.15 se muestran los niveles de los factores seleccionados. Se tomó como variable de respuesta el tiempo máquina que tomó resolver cada una de las instancias de la tabla 4.14, así como los valores de las funciones objetivos costo (ecuación **Ob.1**) y tiempo (ecuación **Ob.2**) obtenidos al resolver cada instancia.

Factores	Niveles	
	Nivel(-)	Nivel (+)
SPB	5	20
CD	10	20
Transporte	1	3
MP	5	10

Tabla 4.15: Factores y niveles

donde SPB representa la cantidad de proveedores, plantas y bodegas con un nivel bajo de 5 y alto de 20, CD representa la cantidad de centros de distribución con un nivel bajo de 10 y un nivel alto de 20, Transporte representa la cantidad de medios de transporte diferentes con un nivel bajo de 1 y un nivel alto de 3 y MP la cantidad de materias primas y productos considerados con un nivel bajo de 5 y un nivel alto de 10.

Para cada instancia (cada réplica de cada combinación de factores) se calcularon 10 puntos del frente de Pareto. En total se generaron 440 instancias, y se realizaron 4400 corridas. En el apéndice B se puede ver la tabla completa de los datos del experimento (tabla B.1). La misma está en el formato que es requerido para poder analizar los datos con las funciones de **R** *lm* (regresión lineal) y *aov* (ANOVA). Es importante recordar que para cada combinación de factores-niveles se

generaron tres réplicas para cada grupo (ver tabla 4.14).

Como punto de partida se analizan los datos:

- Realizando un análisis de correlación entre las variables de respuesta.
- Empleando gráficas de dispersión, gráficas de cajas, y gráficas de coordenadas paralelas para establecer relaciones entre las tres variables de respuesta.
- Se visualizan las relaciones entre las variables de respuesta y las variables predictoras, donde las variables predictoras son los factores.

Las gráficas y tablas pueden revisarse en el apéndice C. Al analizar las gráficas y tablas antes mencionados se tienen las siguientes observaciones:

1. En algunos casos existe un nivel de correlación no despreciable (45 %) entre el tiempo y el costo de distribución, esto se explica por el hecho de que se han tomado valores promedio de los puntos calculados para un frente de Pareto (para cada instancia se promediaron los valores de tiempo y costo de las soluciones del frente calculado).
2. Existe una muy alta correlación (77 %) entre el tiempo de distribución y la cantidad de centros de distribución de cada instancia. Esta correlación es independiente de la estructura de costo empleada.
3. La correlación negativa entre el tiempo y el costo de distribución aparece más frecuentemente y en más alto porcentaje cuando se emplea la estructura hiperbólica que en la lineal y la logarítmica. Eso tal vez explique por qué mientras que no se aprecia una diferencia significativa en los tiempos de cómputo por la elección de la estructura lineal o logarítmica si se aprecia una diferencia que puede ser significativa respecto a estas dos al aplicar la estructura hiperbólica. Todo explica por qué el tiempo de cómputo es mayor al solucionar las instancias empleando esta estructura, ver tablas de correlación en el apéndice C.

4. Tanto el tiempo de cómputo como el costo presentan distribuciones no normales, sin embargo al aplicarles a ambas una transformación logarítmica base 10 se obtiene una aproximación aceptable a la distribución normal en ambas variables (ver figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10).

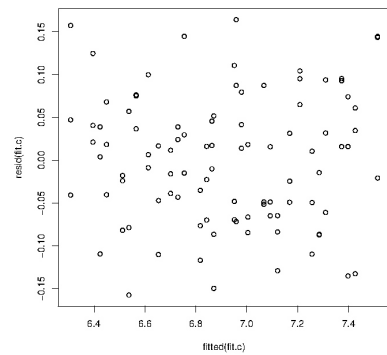


Figura 4.5: Variabilidad del costo

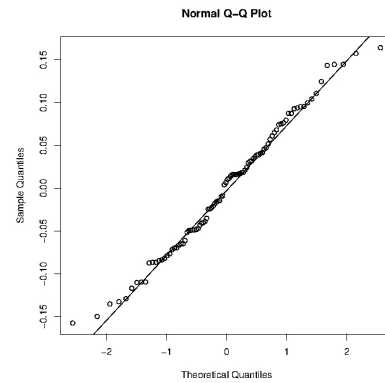


Figura 4.6: Normalidad del costo

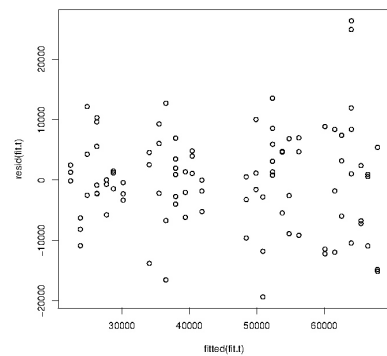


Figura 4.7: Variabilidad del tiempo

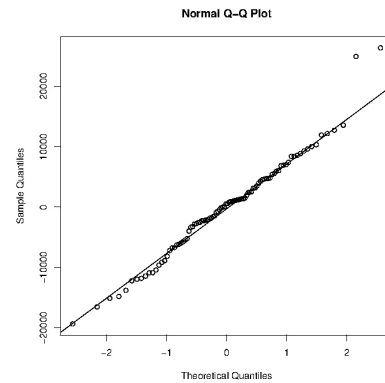


Figura 4.8: Normalidad del tiempo

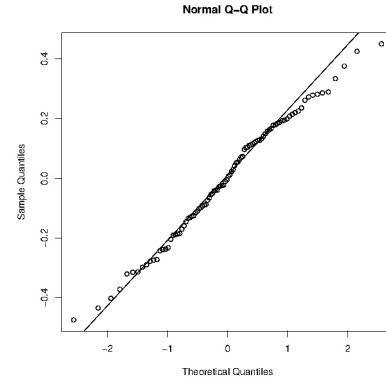
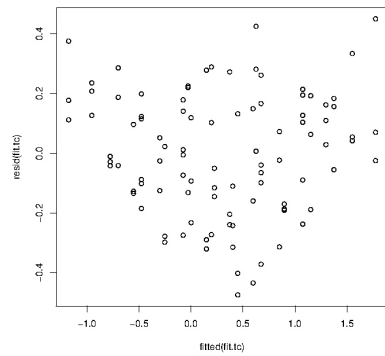


Figura 4.9: Variabilidad del costo-tiempo Figura 4.10: Normalidad del costo-tiempo

A continuación se utilizó el software *Design Expert* y lenguaje *R* para implementar el experimento.

Primero se investigó la relación entre el tiempo de cómputo, los grupos y las estructuras usadas (ver tabla C.1), se determinó que ambos factores tienen efectos significativos en esta variable de respuesta (ver también figura 4.11).

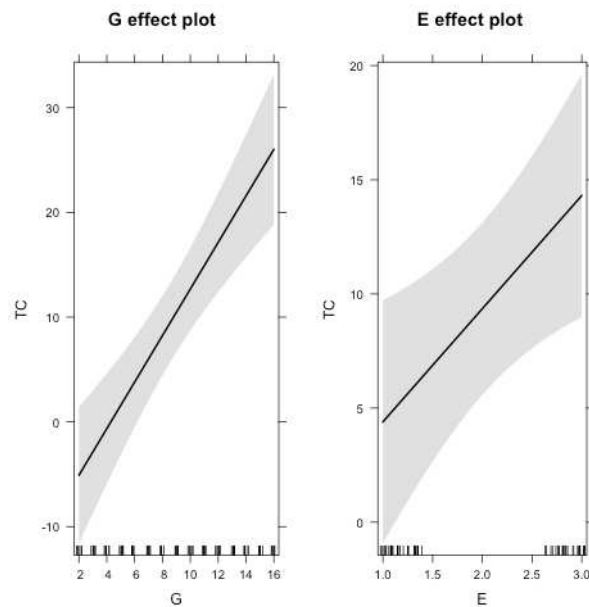


Figura 4.11: Efectos

Se investigó la relación entre los factores y las respuestas mediante los siguientes modelos lineales para ajustar los datos:

$$TiempoComputo = \beta + \beta_1 \cdot SPB + \beta_3 \cdot Tiempo + \beta_4 \cdot MP + \beta_5 \cdot GRUPO + \beta_6 \cdot EST + \epsilon$$

$$Tiempo = \beta + \beta_1 \cdot SPB + \beta_2 \cdot CD + \beta_3 \cdot Tiempo + \beta_4 \cdot MP + \beta_5 \cdot LIN + \beta_6 \cdot LOG + \beta_7 \cdot HYP + \epsilon$$

$$Costo = \beta + \beta_1 \cdot SPB + \beta_2 \cdot CD + \beta_3 \cdot Tiempo + \beta_4 \cdot MP + \beta_5 \cdot LIN + \beta_6 \cdot LOG + \beta_7 \cdot HYP + \epsilon$$

Donde: TiempoComputo, Tiempo y Costo son variables que representan las respuestas del experimento. SPB, Tiempo, CD y MP ya fueron descritas arriba. GRUPO es una variable que representa las combinaciones de factores y EST representa la estructura utilizada para relacionar el tiempo y el costo de la distribución.

En las tablas C.2, C.3, C.4 se pueden observar los resultados de la regresión lineal. Como era de esperarse CD no aporta efectos significativos en la variación del tiempo de cómputo. Una causa probable de esto es que los niveles escogidos de los centros de distribución no sean lo suficientemente diferentes. Aunque en las instancias resueltas de artículos publicados se consideraron instancias con hasta 300 centros de distribución estos no hicieron una diferencia significativa, respecto al objetivo de tiempo con aquellas instancias en las que se tomaron mucho menos centros de distribución. De la que podemos concluir que la cantidad de centros de distribución no aporta variabilidad a los resultados. Más evidencia que apoya esta aseveración se observó al resolver las instancias utilizadas en Olivares (2007) que contienen mucho menos centros de distribución que las de (Cordeau et al., 2006), y sin embargo el tiempo de cómputo requerido para resolverlas es mucho mayor (debido a la estructura de costo hiperbólica que se emplea en las mismas).

Como el R^2 aun puede mejorarse para la regresión lineal (ver tablas C.2, C.3, C.4), probamos con un modelo que incluya todas las interacciones entre los parámetros; al analizar los resultados, ninguna interacción resultó significativa por lo que

también se modificó el modelo tomando como predictores solo los 4 factores predictores básicos en otros modelos se incluyeron las variables GRUPO, EST, VARIABLE, pero ninguno de estos experimentos arrojó resultados significativamente diferentes al modelo que contenía los 4 factores iniciales.

Del análisis de los modelos se obtienen las siguientes observaciones:

- Los factores SPB, Transporte, MP son significativos en sus valores “altos”
- El factor CD no es significativo en la regresión lineal que aproxima al Tiempo de cómputo, sin embargo sí lo es para los objetivos tiempo y costo
- El factor Transporte no es significativo en la aproximación del tiempo de distribución, sin embargo si es significativo para las aproximaciones del tiempo de cómputo y el costo.
- Para el tiempo de cómputo la estructura hiperbólica marca una diferencia significativa, mientras que para el tiempo de distribución la estructura logarítmica es la que marca la diferencia (en ambos casos son los que conducen a los mayores valores de las respuestas).

El cumplimiento de los requerimientos se puede revisar en el apéndice C

4.4 EXPERIMENTACIÓN FASE III: REGIÓN DE INTERÉS

En esta sección se aplica el método NOSGA II (Fernandez et al., 2011) a un ejemplo práctico para ilustrar la fase III de la metodología.

Se considera una instancia con las características estructurales siguientes: 20-20-20-10-1-5-5. Por medio de la aplicación de la fase *II* de la metodología se obtuvieron 12 puntos del frente no dominados (tabla 4.16).

Punto	Tiempo-máquina	Obj. costo	Valor de la función de tiempo
1	5396.459	16898142.6	4813.000
2	27.520	15040577.7	8559.000
3	18.438	14623918.4	12305.000
4	14.720	14369498.4	16051.000
5	3.492	14219582.8	19797.000
6	1.249	14131829.8	23543.000
7	1.434	14104740.8	27289.000
8	0.751	14115882.8	31035.000
9	0.50 2	14066154.8	34781.000
10	0.388	14099665.8	738527.000
11	0.601	14143980.5	42273.000
12	0.054	14056573.8	42279.000

Tabla 4.16: Puntos no dominados de la instancia G10R1

El primer paso consiste en establecer la información preferencial del tomador de decisiones, la misma puede variar en dependencia del método que se emplee para explorar el frente no dominado y obtener la región de interés (*ROI*) del tomador de decisiones.

En el caso de NOSGA II la información preferencial requerida se expresa mediante:

1. Importancia relativa de los objetivos w (criterios): se expresan como pesos, la forma correcta de obtenerlos consiste en resolver ecuaciones de indiferencia entre los objetivos(criterios) (ver por ejemplo Kenney & Raiffa 1976).
2. Umbrales de indiferencia, preferencia débil, preferencia estricta para cada objetivo y condiciones de veto por objetivos o generales. En nuestro caso los umbrales de indiferencia se calcularon como el 5 % del rango y el umbral de preferencia débil se calculó como el 10 % del rango para ambos objetivos.

3. Parámetros de la relación de preferencia borrosa $\sigma(x, y)$:

- λ que representa el nivel de credibilidad del resultado de la comparación entre dos alternativas (usualmente mayor que 0.5).

4. Parámetros de la relación de preferencia asimétrica $xP(\beta, \epsilon)y$:

- ϵ que representa un umbral de simetría empleado para establecer indiferencia en la comparación entre dos alternativas
- β el umbral de asimetría utilizado para distinguir la preferencia en la comparación entre dos alternativas.

Los valores para estos parámetros se muestran en la tabla 4.17, se asume que los mismos han sido elicitados en un proceso en el que participó un analista de la decisión y el tomador de decisiones.

Parámetros	Valores
Importancia relativa de objetivos: $w_1 = \text{costo}; w_2 = \text{tiempo}$	$w_1 = 0.6$ $w_2 = 0.4$
Umbrales de indiferencia, preferencia débil y preferencia estricta para el costo (u_1, q_1, p_1) para el tiempo (u_2, q_2, p_2)	$u_1 = 142078, q_1 = 284157,$ $q_1 < p_1$ $u_2 = 1873, q_2 = 3747, q_2 < p_2$
Nivel de credibilidad λ	$\lambda = 0.6$
Parámetros de la relación de preferencia asimétrica β y ϵ	$\beta = 0.1$ $\epsilon = 0.05$

Tabla 4.17: Parámetros del modelo de preferencias para NOSGA II

A continuación se muestran los resultados para cada paso de la aplicación de NOSGA II (tablas en el apéndice E):

1. Tablas de diferencias entre dos puntos del frente en cada objetivo (**Ob.1**, **Ob.2**), el valor de cada celda d_{ij} de la tabla E.1 y E.2 representa la diferencia

entre los valores de costo y tiempo del punto j y el punto i , $(Costo(j) - Costo(i),$
 $Tiempo(j) - Tiempo(i))$.

2. Tablas de preferencias para costo (tabla E.3) y tiempo (tabla E.4). Se construyen a partir de las tablas de diferencias. Si $-u_1 \leq d_{ij} \leq u_1$ entonces el punto i y el punto j son indiferentes en el costo y en la celda (i, j) el valor se pone como (I) , si $u_1 < d_{ij} \leq q_1$ entonces el punto i es preferido débilmente al punto j en el atributo costo (Q) . Finalmente si $q_1 < d_{ij}$ entonces hay una preferencia estricta en el costo para el punto i sobre el punto j (P) . De igual manera se interpreta la comparación para el objetivo tiempo.
3. Tablas para calcular la relación $c(i, j)$ para todo par de puntos (tabla E.5 y E.6). En estas tablas el valor de cada celda se calcula acorde a la relación de preferencia de los objetivos respectivamente, el valor de la celda w_1 si el costo del punto i es preferido, preferido débilmente o indiferente con el punto j , de lo contrario se asigna un 0 a la celda.
4. Tabla de la relación de preferencia borrosa σ : cada celda de la tabla E.7 se calcula con la fórmula $\sigma(i, j) = c(i, j) * D(i, j)$ donde $c(i, j)$ y $D(i, j)$ son los índices de concordancia y discordancia calculados según el método ELECTRE III consolidando los objetivos (ver apéndice D para una descripción de estos procedimientos).
5. En la tabla 4.18 se presenta la relación de superación para la instancia y la información preferencial considerada.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	PLB	PLB	NPLB	2
2	NPLB		PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	10
3	NPLB	NPLB		PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	9
4	NPLB	NPLB		PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	PLB	8
5	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	PLB	1
6	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	0
7	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	0
8	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	0
9	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	NPLB	0
10	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	NPLB	0
11	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		NPLB	0
12	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB	NPLB		0
	0	0	1	2	3	3	3	3	3	4	4	4

Tabla 4.18: Relación asimétrica de preferencia o relación de superación

Donde *PLB* representa si hay preferencia de i sobre j , y *NPLB* si no hay preferencia de i sobre j . En la última columna para cada fila i se contabilizan los puntos que superan al punto i , en la última fila se contabilizan para cada columna i los puntos que i supera.

Como se observa en la tabla 4.18 los puntos que resultan no superados por ningún otro punto son los puntos 6 al 12. Luego son estos puntos en los que debe concentrarse el tomador de decisiones, son estos puntos los que forman la región de interés (*ROI*) del tomador de decisiones. A falta de otro criterio el conjunto de interés puede reducirse a los puntos 10 al 12, dado que estos superan a un elemento más que los otros. Luego los puntos de interés se han reducido de 12 puntos a sólo 3 puntos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de la investigación y recomendaciones para trabajos futuros en el problema estudiado.

En este trabajo se estudió un problema de apoyo a la decisión para integrar el diseño y planeación de la cadena de suministro desde una perspectiva dirigida a resultados. Se ha desarrollado una metodología de apoyo a la decisión en tres fases para hacer manejable la complejidad de la toma de decisiones. En la fase uno de la metodología se evalúan a los proveedores desde un enfoque de un problema de ordenamiento multicriterio, en la segunda fase de la metodología se obtienen los diseños y planeaciones de la cadena optimizandola bajo las medidas de desempeño de costo y tiempo, en la tercera fase de la metodología se analiza el frente de Pareto para obtener y analizar la región de interes, la *ROI*.

Tanto en la primera como en la tercera fase de la metodología se requiere obtener información preferencial del tomador de decisiones, mientras que en la segunda etapa se obtienen las soluciones eficientes sin requerir información preferencial. De esta manera el proceso de toma de decisiones se puede realizar de forma descomentada en cada etapa, esto es importante porque el desarrollo de la segunda etapa puede durar bastante tiempo en dependencia de la complejidad de la instancia que se esté resolviendo.

La división de la metodología en etapas puede brindar beneficios para el desempeño en general del sistema, como por ejemplo, una vez que los proveedores han sido

pre-seleccionados en la primera etapa, se pueden diseñar planes de capacitación o entrenamiento para garantizar un vínculo estable y duradero con las empresas de la cadena, todo esto antes de pasar a la segunda etapa. Así mismo se puede someter a los proveedores a una nueva etapa evaluativa. La importancia de la tercera etapa radica en que se consideran todas las soluciones eficientes obtenidas en la etapa anterior, entre ellas se buscan aquellas que representan los compromisos más atractivos para el tomador de decisiones. En este punto probablemente habrá que hacer un análisis en detalle del impacto de esas soluciones en las estrategias y políticas de la cadena, incluso pueden considerarse otros criterios que no fueron considerados antes, para comparar entre sí las soluciones eficientes.

Según nuestro conocimiento, es la primera vez que se intenta reflejar una perspectiva orientada a resultados en un modelo cuantitativo de diseño y planeación en un cadena de suministro. En este caso la elección de los objetivos costo y tiempo y el proceso de la selección de proveedores en dos etapas recogen los aspectos más importantes de la perspectiva orientada a resultados. Al incorporar esta perspectiva en el diseño y la planeación de la cadena se logró una cadena de suministro más flexible y segura ante disrupciones que afecten su desempeño y operación

El modelo desarrollado en esta investigación es novedoso ya que integra el diseño y la planeación de una cadena de suministro determinista, multiproducto de tres niveles e incorporar características que no habían sido tratadas de forma simultánea en la literatura. Por otra parte ha mostrado ser flexible ya que en los experimentos realizados se adaptó para resolver problemas con características similares tomados de trabajos publicados.

Un aspecto interesante que resultó de la experimentación fue que, sí bien se observó que al usar diferentes estructuras de costo (relación entre el costo y tiempo de transporte) se obtuvieron diferentes valores para el tiempo computacional lo que evidencia el impacto de las mismas en este. También se observó que el método exacto empleado pudo obtener soluciones de muy buena calidad en tiempos aceptables o buenos en algunos casos. Esto es una evidencia en contra del mito generalizado de

que se requiere algoritmos heurísticos para resolver instancias grandes y complejas de problemas similares.

5.1 TRABAJO FUTURO

En el trabajo realizado hasta ahora no se consideró incertidumbre en los parámetros, una extensión interesante del trabajo sería considerar incertidumbre en las demandas, costos y tiempos de transporte.

Otra extensión de este trabajo podría ser la inclusión de inventarios tanto en plantas como bodegas y permitir la conexión entre ellas, esto permite aplicar el modelo y la metodología aquí aplicada en otros esquemas tal como "make to stock". Al incorporar inventarios tiene sentido incorporar conexiones entre plantas y bodegas para flexibilizar el transporte de inventarios o la distribución de productos.

Una dirección interesante para continuar con la investigación sería añadir múltiples periodos de planeación y el ruteo de vehículos. Aquí los retos más importantes serían la satisfacción de la demanda y mantener los niveles de inventario bajos. Esta situación tiene lugar principalmente en las operaciones de la cadena, pero igualmente pueden ser simuladas para retroalimentar y de esta manera tener mejores diseños de la cadena.

BIBLIOGRAFÍA

- J. Almeida-Dias, J.R. Figueira y B. Roy. Electre tri-c: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions. *European Journal of Operational Research*, 204(3):565 – 580, 2010.
- F Altiparmak, M. Gen, L. Lin y T. Pakson. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers and Industrial Engineering*, 51(1):196–215, 2006.
- S.H. Amin y G. Zhang. An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multiobjective approach. *Expert Systems with Applications*, 39(8):6782–6791, 2012.
- C. Araz y I Ozkarahan. Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multicriteria sorting procedure. *International Journal of Production Economics*, 106(2):585 – 606, 2007.
- Valerie Belton y Theodor J. Stewart. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer, 2002.
- M. Bohanec. *Decision support*. Springer, 2003.
- Jean-Pierre Brans y Bertrand Mareschal. Promethee methods. En *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, 163–186. Springer, 2005.
- Y. Cardona-Valdes, A. Alvarez y D. Ozdemir. A bi-objective supply chain design problem with uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5):821–832, 2011.

- M.A. Castro-Contreras. *Desarrollo e implementación de un framework para la formación de carteras de proyectos de I&D en organizaciones públicas*. Tesis doctoral, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, Mexico, 2007.
- Y. J. Chen. Structured methodology for supplier selection and evaluation in a supply chain. *Information Sciences*, 181(9):1651 – 1670, 2011.
- S. Chopra y P. Meindl. *Administración de la cadena de suministro*. Prentice-Hall, Pearson, 2008.
- Y. Collette y P. Siarry. *Multiobjective Optimization*. Springer, 2003.
- J. F. Cordeau, F. Pasin y M. M. Solomon. An integrated model for logistics network design. *Annals of operations research*, 144(1):59–82, 2006.
- J. F. Cordeau, G. Laporte y F. Pasin. An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment. *International journal of production economics*, 113(2):626–640, 2008.
- H. Doukas. Modelling of linguistic variables in multicriteria energy policy support. *European Journal of Operational Research*, 227(2):227 – 238, 2013.
- M. Ehrgott. *Multicriteria Optimization*. Springer, 2005.
- I. Erol y W. G. Ferrell Jr. A methodology to support decision making across the supply chain of an industrial distributor. *International Journal of Production Economics*, 89(2):119 – 129, 2004.
- B. Feng, Z. Fan y Y. Li. A decision methods for supplier selection in multi-service outsourcing. *International journal of production economics*, 132(2):240–250, 2011.
- E . Fernandez, F. Luz-Flerida y Mazcorro G. Multi-objective optimisation of an outranking model for public resources allocation on competing projects. *International Journal of Operational Research*, 5(2):190–210, 2009.

- E. Fernandez, J. Navarro y A. Duarte. Multicriteria sorting using a valued preference closeness relation. *European Journal of Operational Research*, 185(2):673 – 686, 2008.
- E. Fernandez, E. Lopez, F. Lopez y C. A. Coello-Coello. Increasing selective pressure towards the best compromise in evolutionary multiobjective optimization: The extended nosga method. *Information Sciences*, 181(1):44–56, 2011.
- S. Griffis, J. Bell y D. Closs. Metaheuristics in logistics and supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 33(2):90–106, 2012.
- F.M. Gryna, R Chua y J. Defeo. *Método Juran: análisis y planeación de la calidad*. McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- G. Guillen, F. D. Mele, M. J. Bagajewicz, A. Espuña y L. Puigjaner. Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 60(6):1535–1553, 2005.
- W. Ho, X. Xu y P. Dey. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 202(1):16–24, 2010.
- A. Kanda, S.G. Deshmukh et al. Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics*, 115(2):316–335, 2008.
- J. Knowles y D. Corne. On metrics for comparing non-dominated sets. En *Evolutionary Computation, 2002. CEC 02. Proceedings of the 2002 Congress on*, 2001.
- J. Liu, F-Y Ding y V Lall. Using data envelopment analysis to compare suppliers for supplier selection and performance improvement. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5(3):143–150, 2000.
- X. Luo, C. Wu, D. Rosenberg y D. Barnes. Supplier selection in agile supply chains: An information-processing model and an illustration. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 15(4):249–262, 2009.

- M. Maleki y V. Cruz-Machado. An empirical review on supply chain integration. *Management and Production Engineering Review*, 4(1):85–96, 2013.
- L. Martinelli, A. Battisti y A. Matzarakis. Multicriteria analysis model for urban open space renovation: An application for rome. *Sustainable Cities and Society*, 2014. ISSN 2210-6707. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.07.002>.
- G. Mavrotas. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multiobjective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2):455–465, 2009.
- M.J. Meixell y V. B. Gargeya. Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation research parte E: Logistics and Transportation Review*, 41(6):531–550, 2005.
- S. Melnyk, E. Davis, R. Spekman y J. Sandor. Outcome-driven supply chains. *MIT Sloan Management Review*, 51(2):31–38, 2010.
- M.T. Melo, S. Nickel y F. Saldanha-da Gama. Facility location and supply chain management: A review. *European journal of operational research*, 196(2):401–412, 2009.
- S.J. Mirzapour Al-e hashem, H. Malekly y M.B. Aryanezhad. A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(0):28 – 42, 2011.
- H. Mohammadi Bidhandi, R. Mohd Yusuff, M.M. Megat Ahmad y M.R. Abu Bakar. Development of a new approach for deterministic supply chain network design. *European Journal of Operational Research*, 198(1):121–128, 2009.
- J. Mula, D. Peidro, M. Diaz-Madroñera y E. Vicens. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3):377–390, 2010.

- W.L. Ng. An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem. *European Journal of Operational Research*, 186(3):1059–1067, 2008.
- E. Olivares. *Capacitated fixed cost facility location problem with transportation choices*. Tesis doctoral, Instituto Tecnológico de Monterrey, Mexico, 2007.
- E. Olivares-Benitez, J. L. González-Velarde y A. Keha. Two-echelon supply chain design with lead time choices. En *Memorias del XIII Congreso Latino - Iberoamericano de Investigación Operativa (CLAIO)*, 2006.
- E. Olivares-Benitez, J. L. González-Velarde y R.Z. Ríos-Mercado. A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices. *TOP*, 20(3):729–753, 2012.
- E. Olivares-Benitez, R.Z. Ríos-Mercado y J. L. González-Velarde. A metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. *International Journal of Production Economics*, 2013. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.01.017.
- B.S. Pimentel, G.R. Mateus y F. A. Almeida. Stochastic capacity planning and dynamic network design. *International Journal of Production Economics*, 2013.
- C. Romero. *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Universitaria Textos, Alianza Editorial Madrid, 1993.
- B. Roy. Paradigms and challenges. En *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, 3–24. Springer, 2005.
- B. Roy. *Multicriteria methodology for decision aiding*, volumen 12. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- R. S. Kadadevaramath, C.H. Chen Jason, B. Latha Shankar y K. Rameshkumar. Application of particle swarm intelligence algorithms in supply chain network architecture optimization. *Expert Systems with Applications*, 3(11):10160 – 10176, 2012.

- E.H. Sabri y B.M. Beamon. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28:581–598, 2000.
- B. Sezen. Relative effects of design, integration and information sharing on supply chain performance. *Supply Chain Management: An International Journal*, 103(3): 233 – 240, 2008.
- B. Shankar Latha, S. Basavarajappa, J.CH. Chen y R. S. Kadadevaramath. Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network- a multi-objective evolutionary approach. *Expert Systems with Applications*, 40(2):551 – 562, 2013.
- S.D. Simon. The new science of management decision. En *In Proceedings of the 33rd Conference of the Operational Research Society of New Zealand*. Citeseer, 1960.
- S. Talluri y R. Narasimhan. A note on a methodology for supply base optimization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 52(1):130–139, 2005.
- S. Talluri, R. Narasimhan y A. Nair. Vendor performance with supply risk: A chance-constrained {DEA} approach. *International Journal of Production Economics*, 100(2):212 – 222, 2006.
- Vijay Wadhwa y A Ravi Ravindran. Vendor selection in outsourcing. *Computers & operations research*, 34(12):3725–3737, 2007.
- D. D. Wu. Supplier selection in a fuzzy group setting: A method using grey related analysis and dempster-shafer theory. *Expert Systems with Applications*, 36(5): 8892–8899, 2009.
- T. Wu, D. Shunk, J. Blackhurst y R. Appalla. Aidea: a methodology for supplier evaluation and selection in a supplier-based manufacturing environment. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 11(2):174–192, 2007.
- K. P. Yoon y C.L. Hwang. *Multiple attribute decision making: an introduction*. Número 104. Sage, 1995.

C. Zopounidis y P.M. Pardalos. *Handbook of multicriteria analysis*, volumen 103. Springer, 2010.

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Cadena de suministro de tres niveles con diferentes tipos de medios de transporte.	3
2.1. Proceso de toma de decisiones	8
2.2. Rol del apoyo a la decisión.	9
2.3. Clasificación de los problemas según su problemática.	11
2.4. Perfiles	15
2.5. Método Agmecon2	22
2.6. Métrica de hipervolumen	24
3.1. Metodología propuesta	38
3.2. Fase 1 de la metodología	40
3.3. Relación de los objetivos con la perspectiva orientada a resultados . .	52
3.4. Fase III de la metodología propuesta	54
4.1. chica	62
4.2. mediana	62
4.3. grande	62

4.4. Relación de costo vs tiempo con los diferentes generadores	71
4.5. Variabilidad del costo	74
4.6. Normalidad del costo	74
4.7. Variabilidad del tiempo	74
4.8. Normalidad del tiempo	74
4.9. Variabilidad del costo-tiempo	75
4.10. Normalidad del costo-tiempo	75
4.11. Efectos	75
A.1. Grupo 1 réplica 2	99
A.2. Grupo 1 réplica 3	99
A.3. Grupo 1 réplica 4	99
A.4. Grupo 1 réplica 5	99
A.5. Grupo 2 réplica 1	100
A.6. Grupo 2 réplica 2	100
A.7. Grupo 2 réplica 3	100
A.8. Grupo 2 réplica 4	100
A.9. Grupo 2 réplica 5	100
A.10. Grupo 3 réplica 1	101
A.11. Grupo 3 réplica 2	101
A.12. Grupo 3 réplica 3	101
A.13. Grupo 3 réplica 4	101

A.14.Grupo 3 réplica 5	101
A.15.Grupo 4 réplica 1	102
A.16.Grupo 4 réplica 2	102
A.17.Grupo 4 réplica 3	102
A.18.Grupo 4 réplica 4	102
A.19.Grupo 4 réplica 5	102
A.20.Grupo 5 réplica 1	103
A.21.Grupo 5 réplica 2	103
A.22.Grupo 5 réplica 3	103
A.23.Grupo 5 réplica cuatro	103
A.24.Grupo 5 réplica cinco	103
A.25.Grupo 6 réplica 1	104
A.26.Grupo 6 réplica 2	104
A.27.Grupo 6 réplica 3	104
A.28.Grupo 6 réplica 4	104
A.29.Grupo réplica 1	105
A.30.Grupo 7 réplica 2	105
A.31.Grupo 7 réplica 3	105
A.32.Grupo 7 réplica 4	105
A.33.Grupo 7 réplica cinco	105
A.34.Grupo 8 réplica 1	106

A.35.Grupo 8 éplica 2	106
A.36.Grupo 8 réplica cuatro	106
A.37.Grupo 9 réplica uno	107
A.38.Grupo 9 réplica dos	107
A.39.Grupo 9 réplica tres	107
A.40.Grupo 9 réplica cuatro	107
A.41.Grupo 9 réplica 5	107
B.1. Diagrama de efectos	110

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Jerarquización de los criterios de evaluación	30
2.2. Principales enfoques individuales	30
4.1. Matriz de desempeño	56
4.2. Parámetros de preferencia de los criterios (j): k_j importancia relativa, q_j umbral de preferencia débil, p_j umbral de preferencia estricta	57
4.3. Índice parcial de concordancia	57
4.4. índices de credibilidad	58
4.5. comparación de perfiles	58
4.6. Resultados de la selección de proveedores para diferentes niveles de λ	59
4.7. Tamaño de las instancias de Olivares-Benitez et al. (2006)	61
4.8. Resultados con la métrica de hipervolumen	63
4.9. Porcentaje obtenido con la métrica de cobertura	63
4.10. Tamaño de las instancias de Cordeau	64
4.11. Minimizando costo	66
4.12. Minimizando tiempo	67
4.13. Tiempo de CPU en el problema bi-objetivo	68

4.14. Tamaño de instancias generadas	71
4.15. Factores y niveles	72
4.16. Puntos no dominados de la instancia G10R1	78
4.17. Parámetros del modelo de preferencias para NOSGA II	79
4.18. Relación asimétrica de preferencia o relación de superación	81
 B.1. Datos para el diseño de experimentos	 109
 C.1. Relación entre tiempo de cómputo, grupo y estructura	 111
C.2. Relación entre tiempo de cómputo, SPB, CD, TR, MP, relación lo- garítmica y relación hiperbólica	112
C.3. Relación entre el objetivos de tiempo, SPB, CD, MP, relación lo- garítmica e hiperbólica	113
C.4. Relación entre el tiempo de computo y SPB, CD, MP, relación lo- garítmica e hiperbólica	114
C.5. Tabla de correlación	115
C.6. Tabla de correlación	115
 E.1. Diferencias entre cada par de alternativas en el objetivo costo	 124
E.2. Diferencias entre cada par de alternativas en el objetivo tiempo . . .	125
E.3. Preferencias para el objetivo costo	125
E.4. Preferencias para el objetivo tiempo	126
E.5. Concordancias para el costo	126
E.6. Concordancia para el tiempo	127

E.7. Relación de preferencia borrasa σ	127
---	-----

APÉNDICE A

FRENTES DE LAS INSTANCIAS DE OLIVARES Y EL DE NOSOTROS

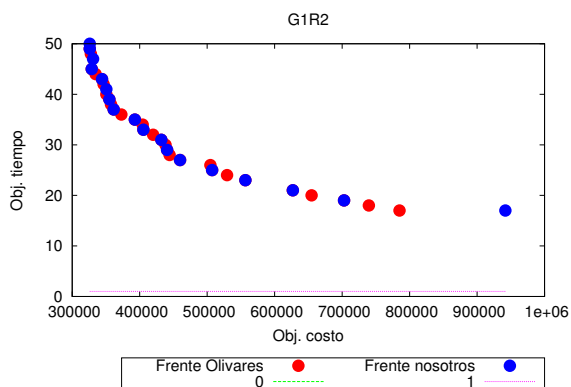


Figura A.1: Grupo 1 réplica 2

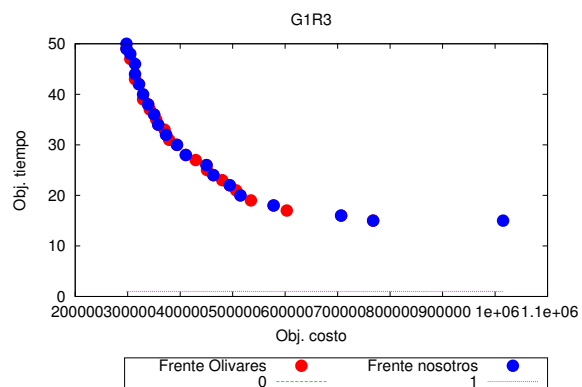


Figura A.2: Grupo 1 réplica 3

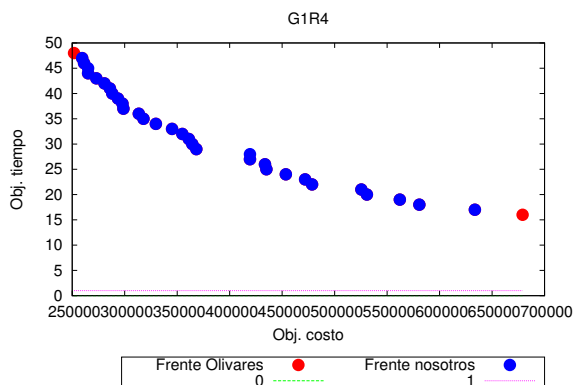


Figura A.3: Grupo 1 réplica 4

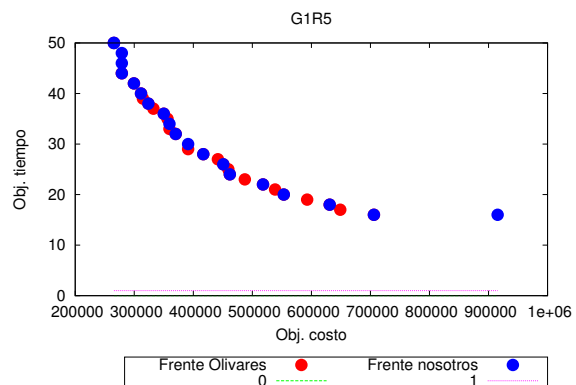


Figura A.4: Grupo 1 réplica 5

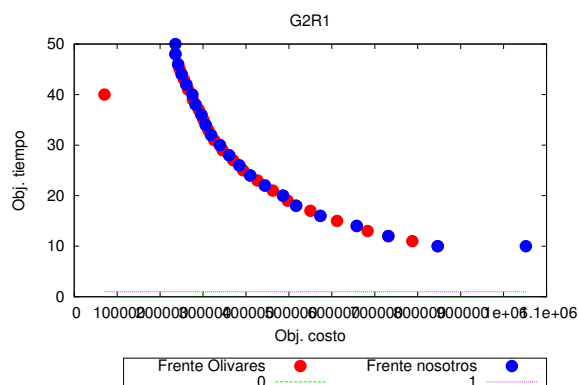


Figura A.5: Grupo 2 réplica 1

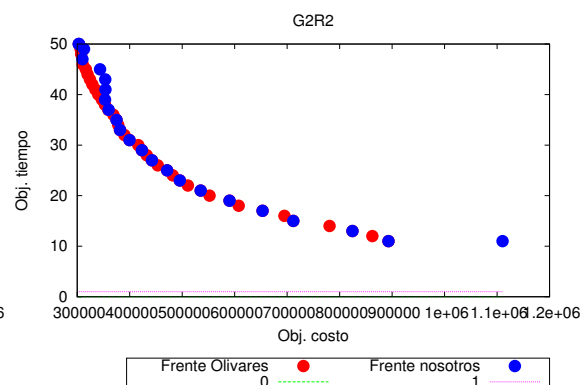


Figura A.6: Grupo 2 réplica 2

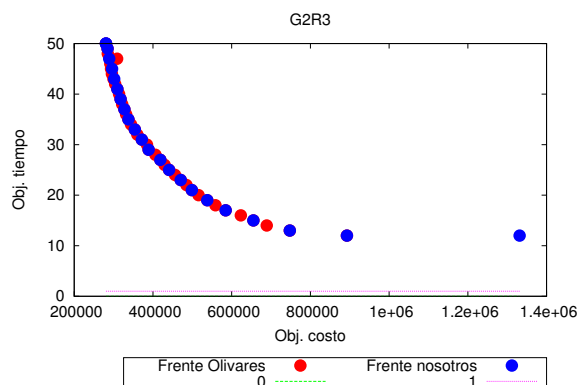


Figura A.7: Grupo 2 réplica 3

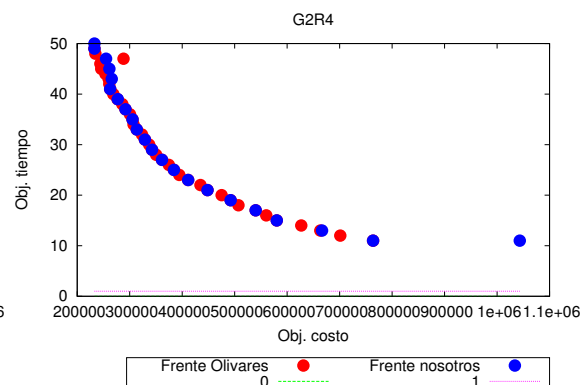


Figura A.8: Grupo 2 réplica 4

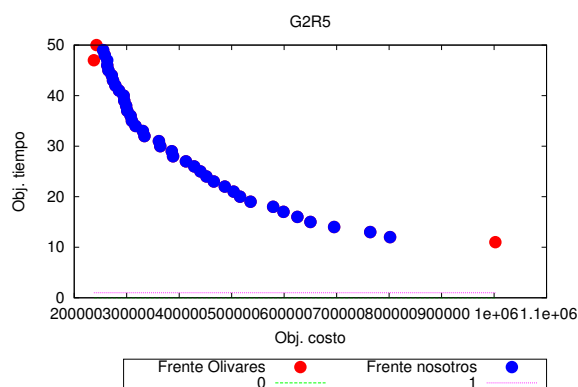


Figura A.9: Grupo 2 réplica 5

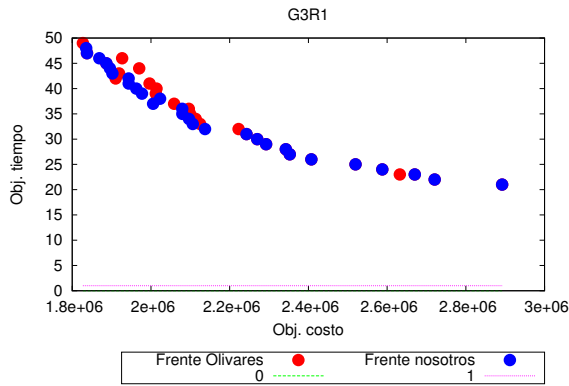


Figura A.10: Grupo 3 réplica 1

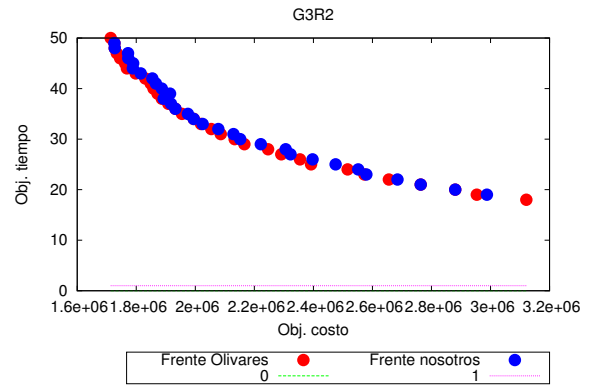


Figura A.11: Grupo 3 réplica 2

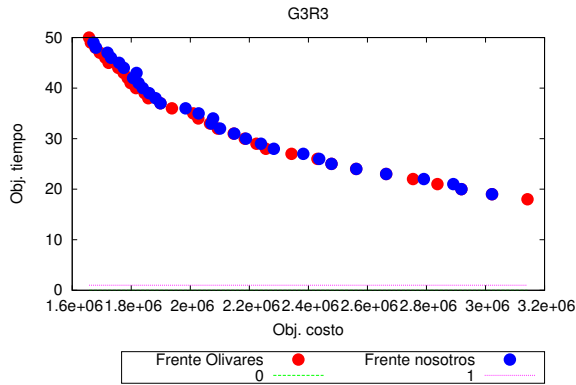


Figura A.12: Grupo 3 réplica 3

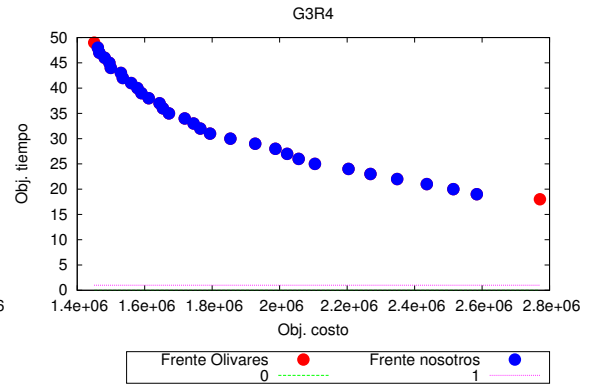


Figura A.13: Grupo 3 réplica 4

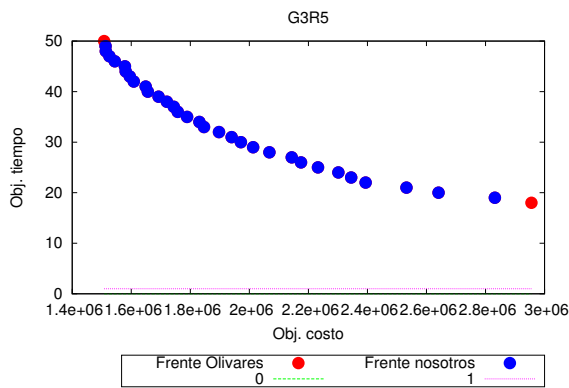


Figura A.14: Grupo 3 réplica 5

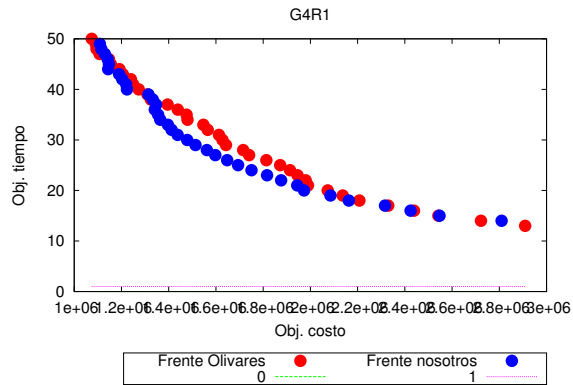


Figura A.15: Grupo 4 réplica 1

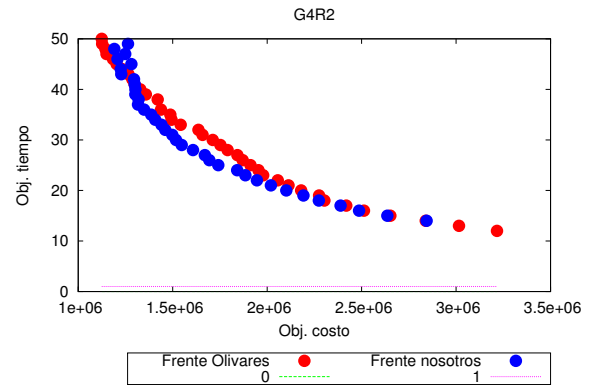


Figura A.16: Grupo 4 réplica 2

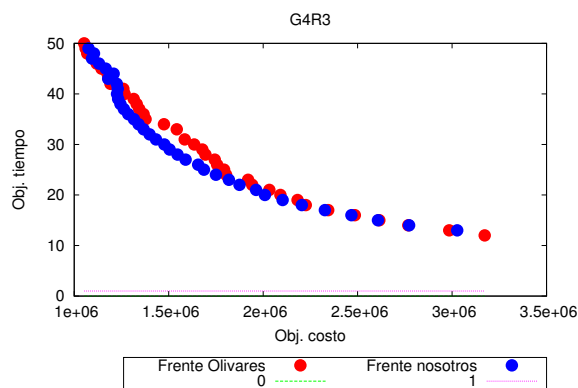


Figura A.17: Grupo 4 réplica 3

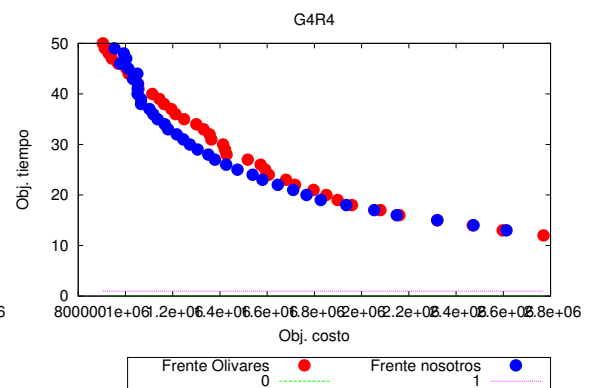


Figura A.18: Grupo 4 réplica 4

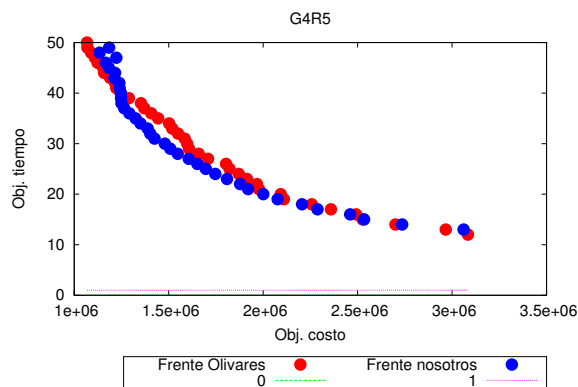


Figura A.19: Grupo 4 réplica 5

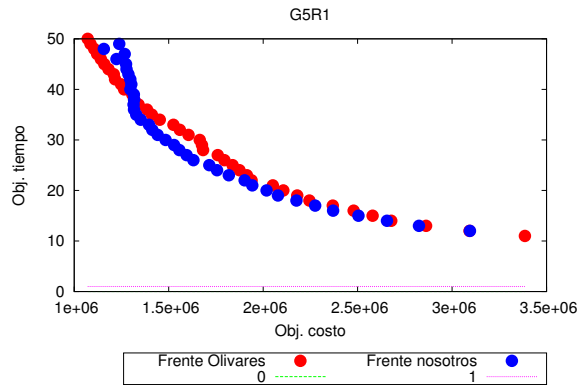


Figura A.20: Grupo 5 réplica 1

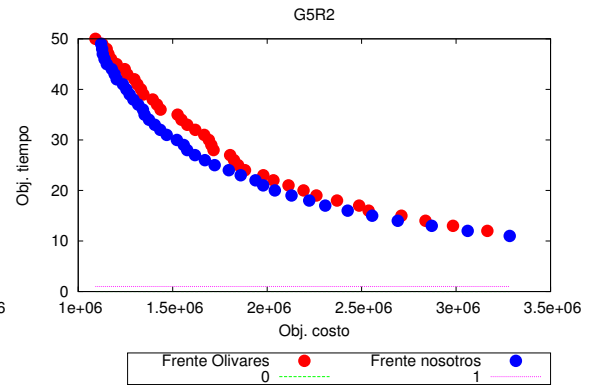


Figura A.21: Grupo 5 réplica 2

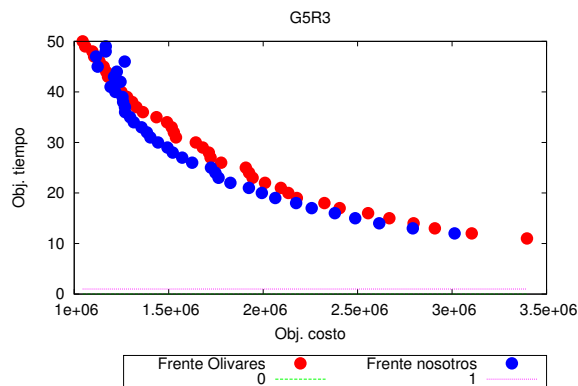


Figura A.22: Grupo 5 réplica 3

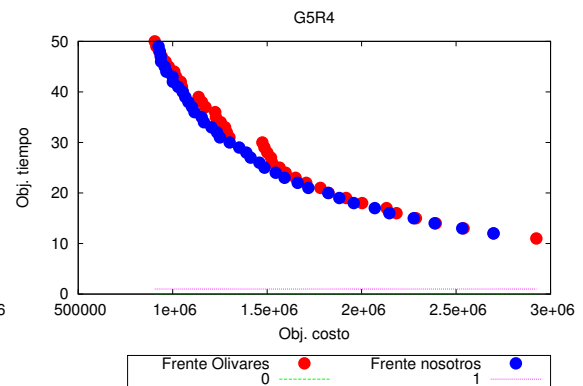


Figura A.23: Grupo 5 réplica cuatro

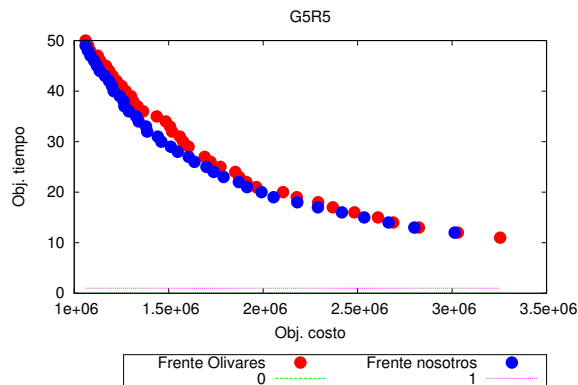


Figura A.24: Grupo 5 réplica cinco

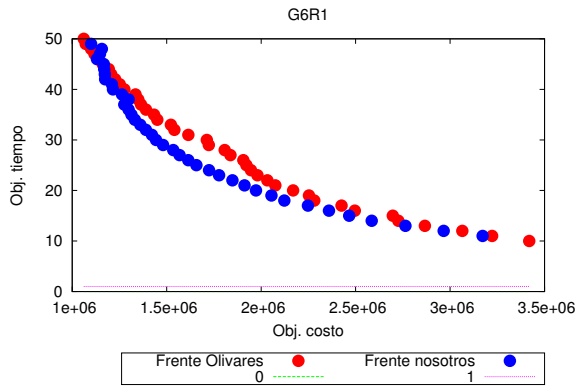


Figura A.25: Grupo 6 réplica 1

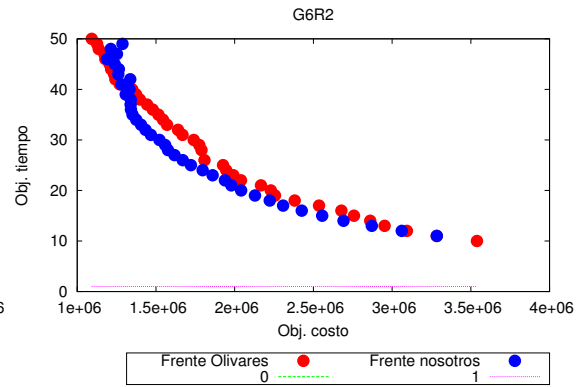


Figura A.26: Grupo 6 réplica 2

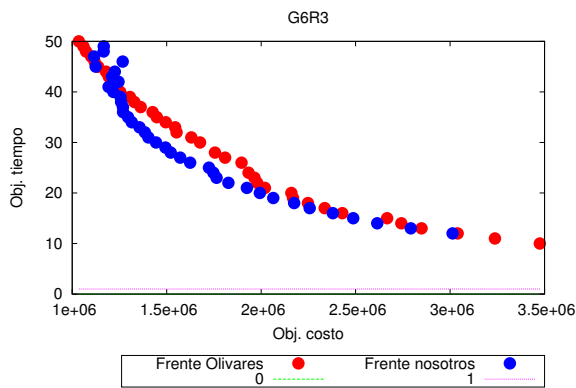


Figura A.27: Grupo 6 réplica 3

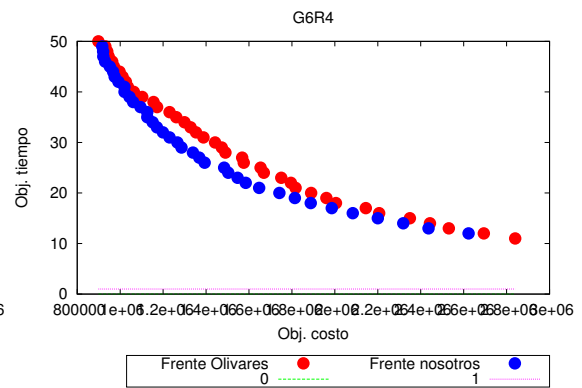


Figura A.28: Grupo 6 réplica 4

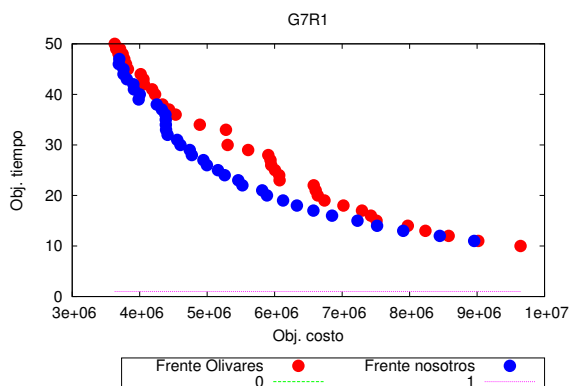


Figura A.29: Grupo réplica 1

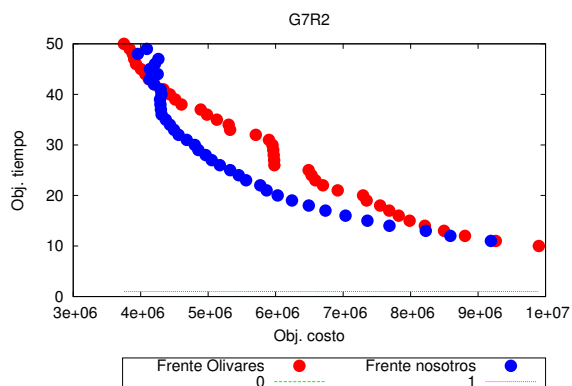


Figura A.30: Grupo 7 réplica 2

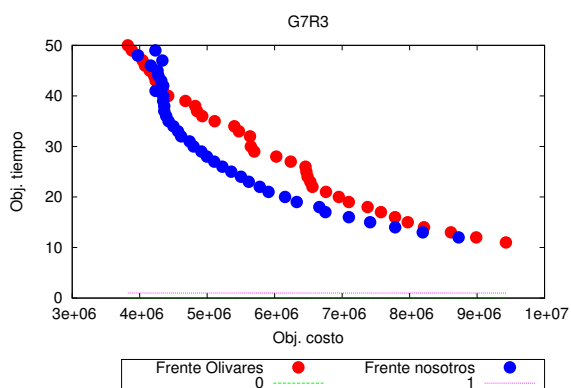


Figura A.31: Grupo 7 réplica 3

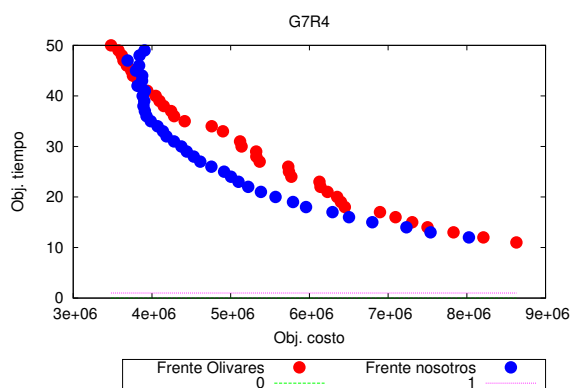


Figura A.32: Grupo 7 réplica 4

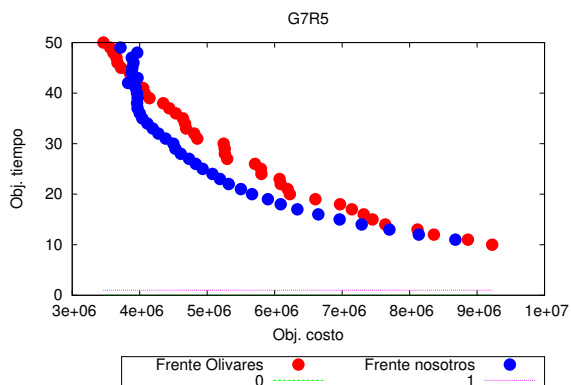


Figura A.33: Grupo 7 réplica cinco

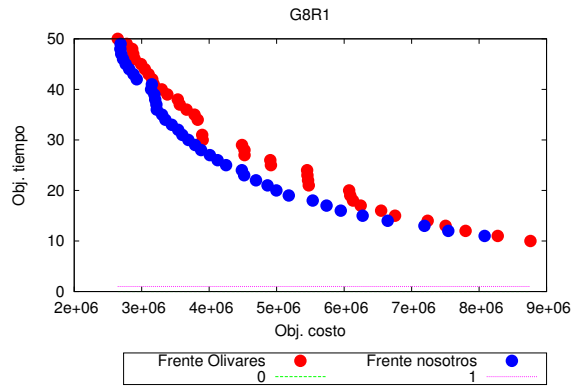


Figura A.34: Grupo 8 réplica 1

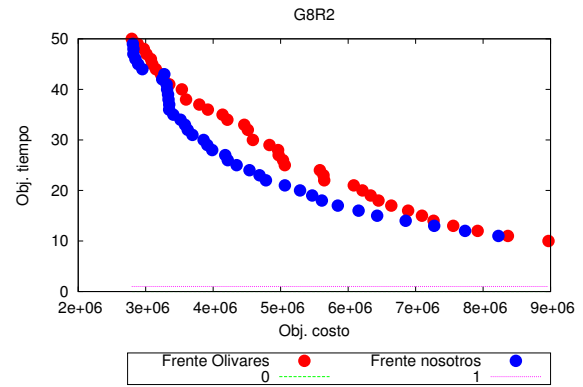


Figura A.35: Grupo 8 éplica 2

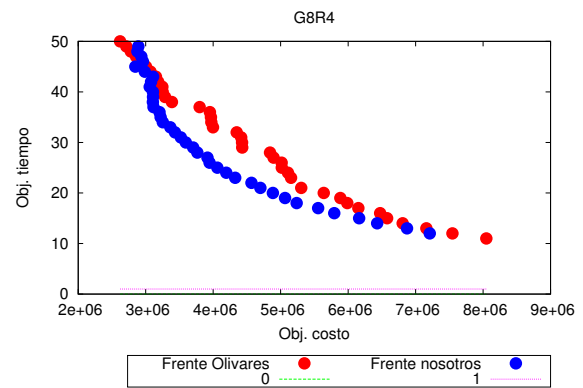
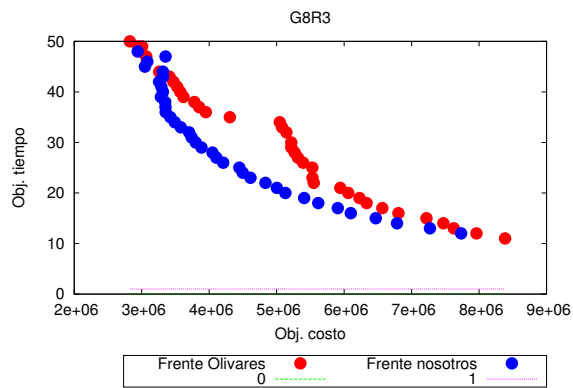
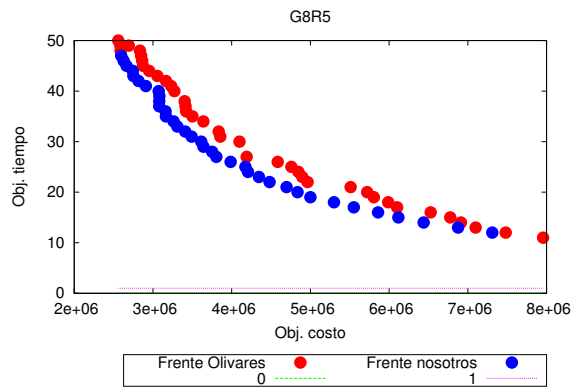


Figura A.36: Grupo 8 réplica cuatro



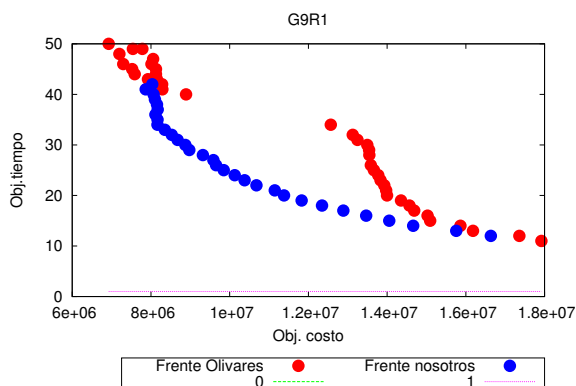


Figura A.37: Grupo 9 réplica uno

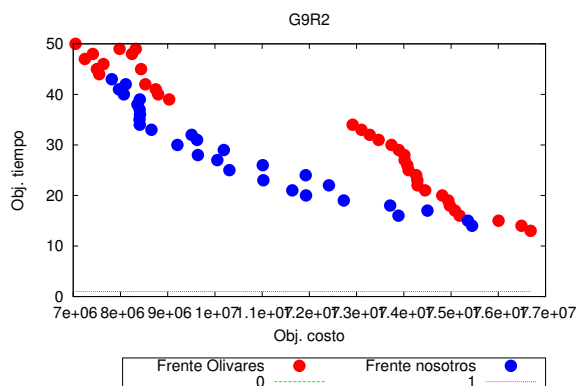


Figura A.38: Grupo 9 réplica dos

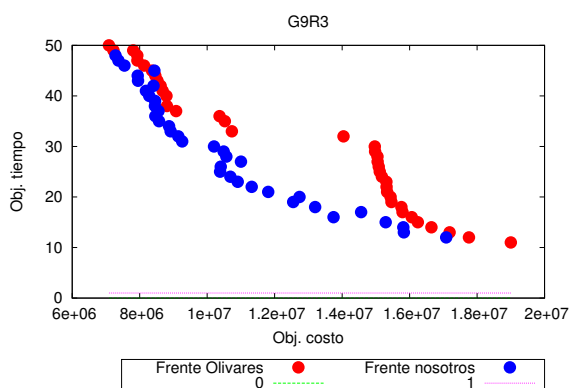


Figura A.39: Grupo 9 réplica tres

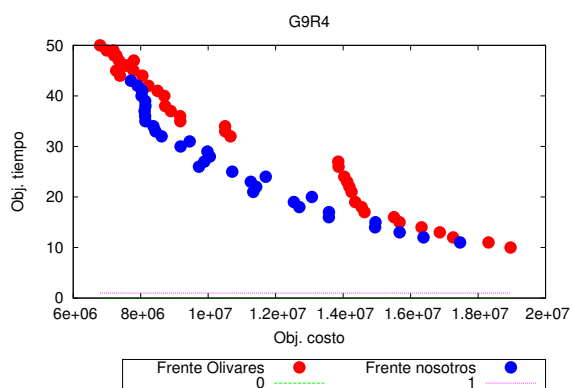


Figura A.40: Grupo 9 réplica cuatro

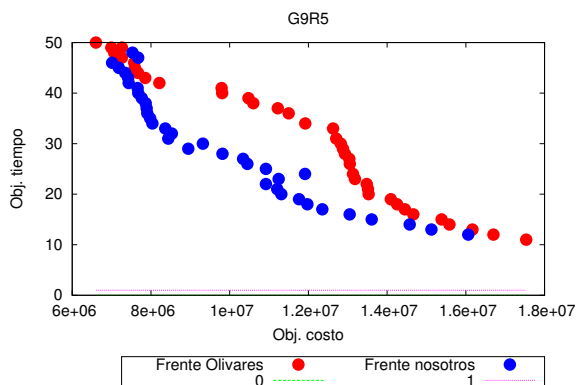


Figura A.41: Grupo 9 réplica 5

APÉNDICE B

DATOS PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Generador lineal								
Réplica	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
R1	0.1579335	0.2183562222	0.3073414	0.5871075	0.1796577778	0.5892722	0.4436384444	1.286134
R2	0.0860895	0.5281198	0.3855008	1.3180524	0.191563	0.2949663	0.2645534	1.2020895
R3	0.1000318	0.2728145	0.1817329	0.8093947	0.1490197	0.2817841	0.4355573	1.4951097
Réplica	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16
R1	1.5570017	6.909705	0.9448359	9.1656639	3.0539022	5.333166	8.6045539	20.8576747
R2	1.5748074	4.0552062	3.8154137	22.01431	0.8388246	5.0874465	3.7560545	36.1454055
R3	0.6929685	4.300659	1.1157103	16.3536505	1.9896996	5.1392859	2.0040498	33.93926222

Generador logaritmico								
Réplica	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
R1	0.1335391	0.636856	0.1376742	0.8482837	0.3452479	0.4090262	0.8811478	1.3534932
R2	0.1587209	0.31405	0.2356218	1.0911541111	0.0998347	0.7309331	0.7311956	0.710103
R3	0.1048635	0.3965906	0.3146077	1.2783804	0.1686497	0.4628324	0.2884172	1.5591216
Réplicas	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16
R1	0.4612408	4.4958311	3.3505478	9.8784799	3.5068936	8.9160807	2.1117603	11.0192168
R2	0.4272315	5.3749673	3.0293147	14.014206	1.6540525	5.5085947	4.4783961	12.5298126
R3	1.6686844	1.2513625	2.754338	11.94634295	1.0332174	9.3921736	3.9014968	17.9158036

Generador hiperbólico								
Réplica	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
R1	0.1632065	0.7094366	0.3762271	1.2221681	0.2089446	0.6732244	0.8640126	8.0665956
R2	0.1566442	1.2681019	0.4733938	1.9568467	0.3497498889	2.6695192222	1.1626394	11.2221418889
R3	0.1518518889	0.4467272222	0.5659326	1.4440257	0.2056895	0.7220555	0.8305193	4.2892518
Réplicas	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16
R1	1.3611284	19.3942145	8.3688126	40.3017519	2.7365543	25.5552442	15.8775007	167.782245
R2	1.4740076	18.5521164	6.7144283	39.1861209	1.4543713333	28.8315976	6.8701021	56.2574493
R3	4.4172262	15.0509897	3.4404058	76.6448607778	5.5697249	21.2032934444	9.6510142	69.9917076

Tabla B.1: Datos para el diseño de experimentos

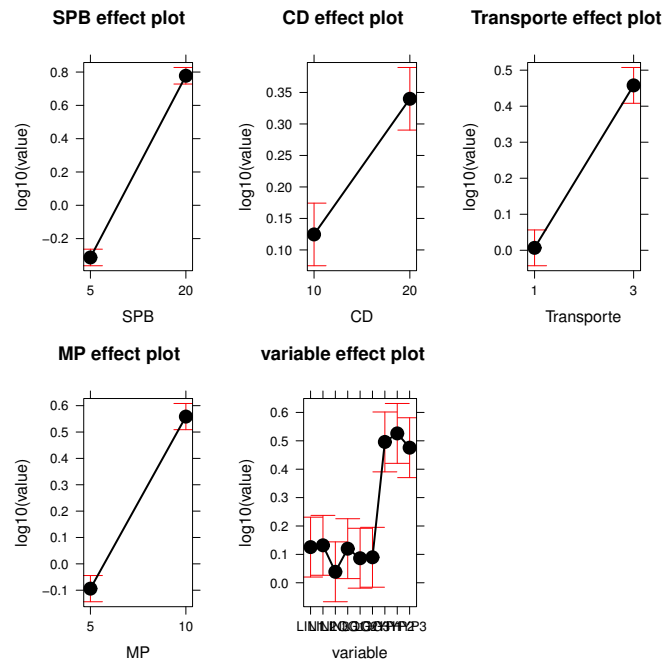


Figura B.1: Diagrama de efectos

APÉNDICE C

RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

```
lm(formula = TC ~ G + E, data = data6)
```

Coefficients:

(Intercept)	G	E
-19.449489	2.222194	4.956986

Tabla C.1: Relación entre tiempo de cómputo, grupo y estructura

```
lm(formula = C ~ SPB + CD + TR + MP + LG + HY, data = data3.0)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-19758195	-8386272	-3455175	6842539	61472872

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-32496423.5	5843723.6	-5.56091	1.3567e-07	***
SPB	-495624.9	147835.8	-3.35254	0.0010354	**
CD	1432889.0	221753.7	6.46162	1.6785e-09	***
TR	-3712533.7	1108768.6	-3.34834	0.0010500	**
MP	5005199.6	443507.4	11.28549	< 2.22e-16	***
LG	28790527.5	2715917.3	10.60066	< 2.22e-16	***
HY	-3670759.4	2715917.3	-1.35157	0.1787395	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 13305220 on 137 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7259655, Adjusted R-squared: 0.7139639

F-statistic: 60.4895 on 6 and 137 DF, p-value: < 2.2204e-16

Tabla C.2: Relación entre tiempo de cómputo, SPB, CD, TR, MP, relación logarítmica y relación hiperbólica

```
lm(formula = T ~ SPB + CD + MP + LG + HY, data = data3.0)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-22791.7882	-5601.0182	-99.1858	6344.8307	29136.7222

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1670.0752	4081.6221	0.40917	0.68304962
SPB	-619.5644	111.6056	-5.55137	1.4041e-07 ***
CD	2752.8035	167.4084	16.44364	< 2.22e-16 ***
MP	1225.0681	334.8167	3.65892	0.00035952 ***
LG	2534.1250	2050.3254	1.23596	0.21857224
HY	1448.1146	2050.3254	0.70629	0.48120148

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 10044.5 on 138 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.6961269, Adjusted R-squared: 0.685117

F-statistic: 63.22737 on 5 and 138 DF, p-value: < 2.2204e-16

Tabla C.3: Relación entre el objetivos de tiempo, SPB, CD, MP, relación logarítmica e hiperbólica

```
lm(formula = TC ~ SPB + TR + MP + LI + LG + HY, data = data3.0)
```

```
Residuals:
```

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-15.983787	-6.616057	-3.071493	2.372553	137.781830

```
Coefficients: (1 not defined because of singularities)
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-20.3228418	5.3982574	-3.76470	0.00024591	***
SPB	0.8529640	0.1661002	5.13524	9.4057e-07	***
TR	3.9082812	1.2457517	3.13729	0.00208492	**
MP	2.1539133	0.4983007	4.32252	2.9337e-05	***
LI	-9.9139728	3.0514560	-3.24893	0.00145498	**
LG	-11.1015705	3.0514560	-3.63812	0.00038705	***
HY	NA	NA	NA	NA	

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 14.94902 on 138 degrees of freedom
```

```
Multiple R-squared:  0.3392683, Adjusted R-squared:  0.3153287
```

```
F-statistic: 14.17187 on 5 and 138 DF,  p-value: 3.482314e-11
```

Tabla C.4: Relación entre el tiempo de computo y SPB, CD, MP, relación logarítmica e hiperbólica

	X	T	C	SPB	CD
X	1.000000000000	0.076774038185	0.033554367377	0.2887378015	0.1443689008
T	0.07677403819	1.000000000000	0.662472334915	-0.3629917064	0.7411871522
C	0.03355436738	0.662472334915	1.000000000000	-0.2325647429	0.4250817391
SPB	0.28873780151	-0.362991706406	-0.232564742949	1.0000000000	0.0000000000
CD	0.14436890075	0.741187152241	0.425081739122	0.0000000000	1.0000000000
TR	0.07218445038	0.002334355973	-0.231851149038	0.0000000000	0.0000000000
MP	0.03609222519	0.265496416437	0.710400702065	0.0000000000	0.0000000000
TC	0.22512999775	-0.038044300631	0.067000653486	0.4857666508	0.1453808150
G	0.33275387469	0.035899830802	0.009383046775	0.8677218313	0.4338609156
E	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla C.5: Tabla de correlación

	TR	MP	TC	G	E
X	0.072184450377	0.03609222519	0.22512999775	0.332753874689	NA
T	0.002334355973	0.26549641644	-0.03804430063	0.035899830802	NA
C	-0.231851149038	0.71040070206	0.06700065349	0.009383046775	NA
SPB	0.000000000000	0.00000000000	0.48576665079	0.867721831275	NA
CD	0.000000000000	0.00000000000	0.14538081501	0.433860915637	NA
TR	1.000000000000	0.00000000000	0.32089474823	0.216930457819	NA
MP	0.000000000000	1.00000000000	0.37661044329	0.108465228909	NA
TC	0.320894748232	0.37661044329	1.00000000000	0.595046363896	NA
G	0.216930457819	0.10846522891	0.59504636390	1.000000000000	NA
E	NA	NA	NA	NA	1

Tabla C.6: Tabla de correlación

	X	T	C	SPB	CD	TR	MP	TC	G	E
X	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
T	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
C	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SPB	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CD	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TR	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MP	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TC	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
G	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
E	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

	X	T	C	SPB	CD
X	1.000000000000	0.003150320338	0.00939676589	0.2887378015	0.1443689008
T	0.003150320338	1.000000000000	0.37484811559	-0.3444945486	0.8340060508
C	0.009396765890	0.374848115586	1.000000000000	-0.2236827766	0.4654339744
SPB	0.288737801509	-0.344494548641	-0.22368277662	1.0000000000	0.0000000000
CD	0.144368900754	0.834006050819	0.46543397441	0.0000000000	1.0000000000
TR	0.072184450377	0.143299313196	-0.09003282986	0.0000000000	0.0000000000
MP	0.036092225189	-0.022497274233	0.74012854358	0.0000000000	0.0000000000
TC	0.116425689989	-0.027633789747	0.17875928776	0.4426204421	0.1453812765
G	0.332753874689	0.091563001862	0.06858653066	0.8677218313	0.4338609156
E	NA	NA	NA	NA	NA

	TR		MP		TC		G E	
X	0.07218445038	0.03609222519	0.11642568999	0.33275387469	NA			
T	0.14329931320	-0.02249727423	-0.02763378975	0.09156300186	NA			
C	-0.09003282986	0.74012854358	0.17875928776	0.06858653066	NA			
SPB	0.00000000000	0.00000000000	0.44262044211	0.86772183127	NA			
CD	0.00000000000	0.00000000000	0.14538127646	0.43386091564	NA			
TR	1.00000000000	0.00000000000	0.27749862827	0.21693045782	NA			
MP	0.00000000000	1.00000000000	0.39409516875	0.10846522891	NA			
TC	0.27749862827	0.39409516875	1.00000000000	0.55009020147	NA			
G	0.21693045782	0.10846522891	0.55009020147	1.00000000000	NA			
E	NA	NA	NA	NA	1			

APÉNDICE D

RELACIÓN DE SUPERACIÓN

En general estudios realizados en el área de optimización multiobjetivo han reportado que al incrementar la cantidad de objetivos, la mayoría de los algoritmos o enfoques, principalmente los estudios basados en la dominancia de Pareto, degradan representativamente su desempeño y la calidad de los resultados obtenidos.

Fernandez et al. (2011) introduce la relación de superación que se basa en una relación de preferencia borrosa y brinda una solución aceptable a la comparación de dos alternativa cuando se emplean muchos objetivos. Esta relación también puede ser usada eficientemente para explorar la frontera de Pareto en busca de compromisos satisfactorios para el tomador de decisiones y así permitirle que se concentre en unos pocos puntos no dominados.

Debido a las dificultades que presenta el resolver un problema con muchos objetivos, la propuesta de Fernandez et al. (2011) se basa en un esquema de reducción de objetivos; para esto definen una relación inspirada en los métodos *ELECTRE* en el conjunto de las carteras. Esta relación permite comparar las carteras dos a dos en cuanto a las preferencias del tomador de decisión.

El modelo de las preferencias del DM puede ser considerado como una relación de preferencia borrosa; estas relaciones son un buen compromiso entre las funciones de valor y las relaciones de preferencia inestables. Las relaciones borrosas son relaciones numéricas como funciones de valor pero pueden modelar fácilmente la incomparabilidad y no la transitividad.

A continuación se describen conceptos requeridos para definir finalmente la relación de superación (tomados de Fernandez et al. (2011)).

Definición 1: Sea O un conjunto de alternativas, sea σ una relación de preferencia borrosa en OxO , con $\sigma(x, y)$ representando el valor de credibilidad de la afirmación "x es al menos tan bueno como y". La condición $\sigma(x, y) \leq \lambda$ define una relación de sobreclasificación "firme" (no borrosa) xSy . Consideramos la existencia de un umbral $\lambda > 0.5$ aceptable para el predicado xSy y los parámetros de asimetría y simétrica $\beta > 0$ y ϵ ($0 < \epsilon < \beta < \lambda$) respectivamente.

Definición 2: Una relación de preferencia estricta es denotada de la siguiente manera $xP(\lambda, \beta)y$ y se da al cumplirse los 3 siguientes enunciados:

1. x domina a y
2. $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < 0.5$
3. $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge 0.5 \leq \sigma(y, x) < \lambda \wedge \sigma(x, y) - \sigma(y, x) \geq \beta$

Definición 3: Una relación de indiferencia esta denotada por $xI(\lambda, \epsilon)$ y se cumple si se satisfacen los siguientes enunciados:

1. $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) \geq \lambda$
2. $|\sigma(x, y) - \sigma(y, x)| \leq \epsilon$

Definición 4: La relación de preferencia débil es denotada por $xQ(\lambda, \beta, \epsilon)y$ dada por la conjunción de los siguientes enunciados:

1. $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(x, y) > \sigma(y, x)$
2. $xP(\lambda, \beta)y$
3. $xI(\lambda, \epsilon)y$

Definición 5: La relación de incomparabilidad esta definida por $\sigma(x, y) \geq \lambda \wedge \sigma(y, x) < \lambda$

Definición 6: Sea C denota un especificación de parámetros λ, β, ϵ ($\lambda > 0.5 > \beta > \epsilon > 0$). Nosotros decimos que C es preferentemente constante si $P(\lambda, \beta), I(\lambda, \epsilon), Q(\lambda, \beta, \epsilon), R(\lambda)$ definidas anteriormente forman un sistema de preferencias en el sentido de ((Roy, 1996)).

A continuación nosotros suponemos que C es preferentemente constante.

Las siguientes definiciones son adaptadas por (Fernandez et al., 2009):

Definición 7: Sea B un subconjunto de O . Si no existe y elemento de A tal que $yP(\lambda, \beta)x$, decimos que x es P-no superada estrictamente

Definición 8: $P(\lambda, \beta)$ se dice libre de inconsistencias si no hay ciclos de la relación en O .

Definición 9: $P(\lambda, \beta)$ se dice que es mínimamente libre de inconsistencias si no existe por lo menos una solución P-no superada estrictamente en O .

Definición 10: Sea $B \subset O$, $\forall x \in B$ definimos el siguiente conjunto de soluciones que superan a x estrictamente como

$$(S_B)_x = \{y \in B \mid yP(\lambda, \beta)x\}$$

$card(S_B)_x$ es su cardinal, una función de numero entero dependiente de x . Como podemos observar si x es una solución P-no superada en O entonces $card(S_B)_x = 0$.

Definición 11: El conjunto $N_s = \{x \in O \mid que \frac{card}{(S_0)_x} = 0\}$ es llamado la frontera P-no superada del problema 1

Definición 12: Sea $B \subset O$, $\forall X \in B$ definimos el siguiente conjunto de soluciones que superan débilmente a x como $(W_B)_x = \{y \in B \mid yQ(\lambda, \beta, \epsilon)x\}$ $card(W_B)_x$ es su cardinal, una función de número entero dependiente de x .

Definición 13: Sea $B \subset O$. $\forall X \in B$ es una solución P- no superada débilmente

si $\text{card}(S_B)_x = \text{card}(W_B)_x = 0$.

Definición 14: Dada $\sigma(x, y)$ un relación de preferencia borrosa en el conjunto B , sea $a \in B$ se define el conjunto neto de a como:

$$F_n(a) = \sum_{c \in B - \{a\}} [\sigma(a, c) - \sigma(c, a)]$$

Definición 15: Sea $B \subset O$. $\forall X \in B$ definimos el siguiente conjunto de soluciones que superan en flujo neto a x como

$$(F_B)_x = \{y \in B \mid F_n(y) > F_n(x)\}$$

En base a estas definiciones podemos establecer el esquema de reducción de objetivos cuando partimos de un problema de optimización multiobjetivo definido de forma general de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } F = (f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)) \quad (1)$$

s.a.

$$z \in RF \quad (2)$$

Y donde z denota el vector de variables de decisión y RF (Región de Factibilidad) es determinado por el conjunto de restricciones.

Los objetivos de este problema pueden ser reducidos en base a las definiciones anteriores en la siguiente forma:

$$\text{Minimizar}(\text{card}(S_o)_x, \text{card}(W_{NS})_x, \text{card}(F_{NW})_x) \text{ Sujeto a } x \in O \quad (3)$$

Nuestro esquema de reducción de objetivos esta basado en el modelo anterior:

$$\text{Minimizar}(\text{card}(S_o)_x, \text{card}(W_B)_x, \text{card}(F_B)_x) \text{ Sujeto a } x \in O \quad (4)$$

Donde $B = \{y \in O \text{ tal que } card(S_o)_x = card(S_o)_y\}$

Al reducir el cardinal de objetivos a solo tres nos permite trabajar con problemas con objetivos iniciales mucho mayor a dos. Esta reducción de objetivos facilita la comparación 2 a 2 lo que también facilita al tomador de decisiones la toma de su decisión final, ya que se busca la mejor solución compromiso.

Pseudocódigo para obtener los puntos no superados, o los puntos más atractivos desde el punto de vista de la relación de superación.

1. Identificar aquellos puntos no dominados tales que $mincard(S_o)_x$
2. Entre este conjunto identificar aquellos puntos tales que $\min card(W_B)_x$, donde $B = \{y | talque card(S_o)_x = card(S_o)_y\}$
3. Finalmente en el conjunto obtenido en el paso 2 determinar aquellos puntos en los cuales $mincard(F_B)_x$.

Si la relación de superación no contiene ciclos entonces $card(S_o)_x=0$.

APÉNDICE E

RESULTADOS DE LA FASE 3 DE LA
METODOLOGÍA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		-1857564.88269	-2274224.26131	-2528644.26131	-2678559.81668	-2766312.81668	-2793401.81668	-2782259.81668	-2831987.81668	-2798476.81668	-2754162.10345	-2841568.81668
2	1857564.88269		-416659.378620001	-671079.378620001	-820994.93399	-908747.93399	-935836.93399	-924694.93399	-974422.93399	-940911.93399	-896597.220760001	-984003.93399
3	2274224.26131	416659.378620001		-254420	-404335.555369999	-492088.555369999	-519177.555369999	-508035.555369999	-557763.555369999	-524252.555369999	-479937.84214	-567344.555369999
4	2528644.26131	671079.378620001	254420		-149915.555369999	-237668.555369999	-264757.555369999	-253615.555369999	-303343.555369999	-269832.555369999	-225517.84214	-312924.555369999
5	2678559.81668	820994.93399	404335.555369999	149915.555369999		-87753	-114842	-103700	-153428	-119917	-75602.2867700011	-163009
6	2766312.81668	908747.93399	492088.555369999	237668.555369999	87753		-27089	-15947	-65675	-32164	12150.7132299989	-75256
7	2793401.81668	935836.93399	519177.555369999	264757.555369999	114842	27089		11142	-38586	-5075	39239.7132299989	-48167
8	2782259.81668	924694.93399	508035.555369999	253615.555369999	103700	15947	-11142		-49728	-16217	28097.7132299989	-59309
9	2831987.81668	974422.93399	557763.555369999	303343.555369999	153428	65675	38586	49728		33511	77825.7132299989	-9581
10	2798476.81668	940911.93399	524252.555369999	269832.555369999	119917	32164	5075	16217	-33511		44314.7132299989	-43092
11	2754162.10345	896597.220760001	479937.84214	225517.84214	75602.2867700011	-12150.7132299989	-39239.7132299989	-28097.7132299989	-77825.7132299989	-44314.7132299989		-87406.7132299989
12	2841568.81668	984003.93399	567344.555369999	312924.555369999	163009	75256	48167	59309	9581	43092	87406.7132299989	

Tabla E.1: Diferencias entre cada par de alternativas en el objetivo costo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		3746	7492	11238	14984	18730	22476	26222	29968	33714	37460	37466
2	-3746		3746	7492	11238	14984	18730	22476	26222	29968	33714	33720
3	-7492	-3746		3746	7492	11238	14984	18730	22476	26222	29968	29974
4	-11238	-7492	-3746		3746	7492	11238	14984	18730	22476	26222	26228
5	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	7492	11238	14984	18730	22476	22482
6	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	7492	11238	14984	18730	18736
7	-22476	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	7492	11238	14984	14990
8	-26222	-22476	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	7492	11238	11244
9	-29968	-26222	-22476	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	7492	7498
10	-33714	-29968	-26222	-22476	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		3746	3752
11	-37460	-33714	-29968	-26222	-22476	-18730	-14984	-11238	-7492	-3746		6
12	-37466	-33720	-29974	-26228	-22482	-18736	-14990	-11244	-7498	-3752	-6	

Tabla E.2: Diferencias entre cada par de alternativas en el objetivo tiempo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
2	NP		P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
3	NP	NP		Q	P	P	P	P	P	P	P	P
4	NP	NP	NP		Q	Q	Q	Q	P	Q	Q	P
5	NP	NP	NP	NP		I	I	I	Q	I	I	Q
6	NP	NP	NP	NP	I		I	I	I	I	I	I
7	NP	NP	NP	NP	I	I		I	I	I	I	I
8	NP	NP	NP	NP	I	I	I		I	I	I	I
9	NP	NP	NP	NP	NP	I	I	I		I	I	I
10	NP	NP	NP	NP	I	I	I	I	I		I	I
11	NP	NP	NP	NP	I	I	I	I	I	I		I
12	NP	NP	NP	NP	NP	I	I	I	I	I	I	

Tabla E.3: Preferencias para el objetivo costo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
2	Q		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
3	P	Q		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
4	P	P	Q		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
5	P	P	P	Q		NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
6	P	P	P	P	Q		NP	NP	NP	NP	NP	NP
7	P	P	P	P	P	Q		NP	NP	NP	NP	NP
8	P	P	P	P	P	P	Q		NP	NP	NP	NP
9	P	P	P	P	P	P	P	Q		NP	NP	NP
10	P	P	P	P	P	P	P	P	Q		NP	NP
11	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Q		I
12	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	I	

Tabla E.4: Preferencias para el objetivo tiempo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
2	0.6		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
3	0.6	0		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
4	0.6	0	0		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
5	0.6	0	0	0		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
6	0.6	0	0	0	0.6		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
7	0.6	0	0	0	0.6	0.6		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
8	0.6	0	0	0	0.6	0.6	0.6		0.6	0.6	0.6	0.6
9	0.6	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6		0.6	0.6	0.6
10	0.6	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		0.6	0.6
11	0.6	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		0.6
12	0.6	0	0	0	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	

Tabla E.5: Concordancias para el costo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.4	0.4		0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.4	0.4	0.4		0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0	0	0	0	0	0
6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0	0	0	0	0
7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0	0	0	0
8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0	0	0
9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0	0
10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0	0
11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		0.4
12	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	

Tabla E.6: Concordancia para el tiempo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
2	1		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
3	1	0.4		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
4	1	0.4	0.4		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
5	1	0.4	0.4	0.4		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
6	1	0.4	0.4	0.4	1		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
7	1	0.4	0.4	0.4	1	1		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
8	1	0.4	0.4	0.4	1	1	1		0.6	0.6	0.6	0.6
9	1	0.4	0.4	0.4	0.4	1	1	1		0.6	0.6	0.6
10	1	0.4	0.4	0.4	1	1	1	1	1		0.6	0.6
11	1	0.4	0.4	0.4	1	1	1	1	1	1		1
12	1	0.4	0.4	0.4	0.4	1	1	1	1	1	1	

 Tabla E.7: Relación de preferencia borrasa σ

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

María de los Ángeles Báez Olvera

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

APOYO A LA DECISIÓN PARA EL DISEÑO Y LA
PLANEACIÓN INTEGRADOS DE UNA CADENA DE
SUMINISTRO

Nací en la ciudad de Querétaro el 22 de febrero de 1984. Soy la segunda hija del Sr. Miguel Angel Báez Reyes y la Sra. Mercedes Olvera Ramírez. Curse la licenciatura en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro obteniendo el grado de Licenciada en Matemáticas Aplicadas en el 2008. Realicé mis estudios de maestría en el Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Actualmente soy estudiante del mismo posgrado, donde realizo mis estudios de doctorado. He trabajado bajo la supervisión de la Dra. Ada Margarita Álvarez Socarrás y el Dr. Fernando López del mismo posgrado en la realización de este trabajo de tesis titulado " Apoyo a decisión para el diseño y planeación integrados de una cadena de suministro".